




Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Volum I
Memòria



“ESTUDI DE L’EFECTE DEL CORRENT ELÈCTRIC POLSANT SOBRE LES PROPIETATS MECÀNIQUES D’ALIATGES D’ALUMINI”

TFG presentat per optar al títol de GRAU en
ENGINYERIA MECÀNICA per **Alexandre Pozuelo
Montfort**

Barcelona, 26 d’abril de 2016

Director: Jordi Jorba Peiró

Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica (CMEM)

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDEX MEMÒRIA

Índex memòria.....	1
Resum.....	2
Resumen	2
Abstract.....	2
Agraïments	4
Capítol 1: Introducció	5
1.1. Estat de l'art	6
1.1.1. L'electroplasticitat	6
1.1.2. Models teòrics.....	6
1.1.3. Camps d'aplicació i materials	7
1.2. Objecte del projecte	8
Capítol 2: Metodologia experimental.....	9
2.1. Fabricació de les mordaces.....	9
2.2. Material base.....	12
2.2.1. Procés de laminació	14
2.2.2. Determinació de la duresa	16
2.3. Preparació de les mostres	17
2.3.1. Mecanitzat.....	19
2.3.2. Metrologia i identificació de les mostres	22
2.4. Assaig de microtracció.....	25
2.4.1. Preparació de la màquina i assaig.....	25
2.4.1. Processat de dades.....	28
Capítol 3: Anàlisi i discussió dels resultats.....	33
3.1. Velocitat d'assaig de 1,58 mm/min.....	34
3.2. Velocitat d'assaig de 5 mm/min	37
3.3. Velocitat d'assaig de 15,81 mm/min.....	40
3.4. Efecte de la velocitat sobre el valor límit elàstic	43
3.5. Efecte de la velocitat sobre el valor de la tensió de ruptura	45
3.6. Comparació de mètodes de processat.....	46
Capítol 4: Conclusions.....	49
4.1. Línies futures.....	51
Capítol 5: Bibliografia	53
5.1. Referències bibliogràfiques.....	53
5.2. Bibliografía de Consulta	54

RESUM

En aquest treball s'ha realitzat un estudi sobre l'efecte que provoca el corrent elèctric polsant en les propietats mecàniques d'un alumini AW1050 H14, mitjançant assajos de microtracció. Prèviament als assajos, partint d'una xapa d'alumini de 1 mm d'espessor, aquesta ha estat laminada en fred aproximadament al 50% respecte al gruix de material inicial amb la finalitat d'incrementar el nombre de dislocacions a l'interior del material i potenciar així l'efecte electroplàstic.

S'han assajat mostres mecanitzades a 0° i 90° respecte a la direcció de laminació d'aquestes per tal de comparar a partir de l'anàlisi les diferències entre el comportament d'ambdues espècies amb i sense l'aplicació de polsos de corrent elèctric, assajades a 3 velocitats de deformació diferents: 1,58mm/min, 5 mm/min i 15,81 mm/min.

RESUMEN

En este trabajo se ha realizado un estudio sobre el efecto que provocan los pulsos de corriente eléctrica en las propiedades mecánicas de un aluminio AW1050 H14, mediante ensayos de micro-tracción. Previamente a los ensayos, partiendo de una chapa de aluminio de 1mm de espesor, esta ha sido laminada aproximadamente al 50% respecto al espesor inicial con el objetivo de incrementar el número de dislocaciones en el interior del material y potenciar así el efecto electroplástico.

Se han ensayado muestras mecanizadas a 0° y 90° respecto a la dirección de laminación de estas con tal de comparar a partir del análisis las diferencias entre el comportamiento de ambas con y sin la aplicación de pulsos de corriente eléctrica, ensayadas a 3 velocidades de deformación diferentes: 1,58 mm/min, 5 mm/min y 15,81 mm/min.

ABSTRACT

In this project it has been done a study about the effect of a pulsed electrical current on the mechanical properties of aluminium AW1050 H14 during a micro-tensile test. Prior to the testing, starting from a sheet of aluminium with 1mm of thickness, it has been rolled approximately at 50% with the aim of increase the

number of dislocations inside the material and the enhance of the electroplastic effect.

Samples manufactured at 0° and 90° have been tested with the roll direction of those with the aim of compare the analysis of the differences in their behaviour in normal conditions and under the influence of electric current pulses, tested in 3 different deformation velocities: 1.58 mm/min, 5 mm/min and 15.81 mm/min.

AGRAÏMENTS

M'agradaria agrair el suport i la dedicació dels professors del departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica (CMEM), en concret l'ajuda d'en Jordi Jorba, Jordi Llumà i Sílvia Garcia, ja que si no fos per els seus consells i la seva disposició a ajudar-me aquest treball no hagués estat possible.

També agrair al meu amic i company de laboratori Adrià Fernández la seva ajuda, companyia i cooperació durant el projecte.

CAPÍTOL 1:

INTRODUCCIÓ

Nombrosos físics i científics d'arreu del món han estat investigant al llarg de la història possibles maneres de modificar les propietats mecàniques dels materials per tal de poder aconseguir les més adients d'acord amb les necessitats requerides, donant com a resultat processos de tractaments tèrmics, que alliberen les tensions internes dels material; processos de conformat, ja sigui en fred o en calent, com la laminació, l'embotiment, el doblegat, etc. Com a alternativa a aquests va sorgir l'electroplasticitat, un efecte produït per el corrent elèctric que pot fer variar propietats dels materials tals com l'elongació i la deformabilitat quan aquests eren sotmesos a esforç. En el present projecte es durà a terme un estudi per intentar explicar els efectes atèrmics produïts per aquest fenomen. Per tal d'aïllar efecte tèrmic generat durant el pas de corrent, aquest s'ha fet passar per les provetes en forma de polsos d'una freqüència de 400 Hz i una durada 200µs mentre aquestes eren assajades a tracció. Aquest efecte s'ha volgut provar experimentant en tot tipus de mecanitzats i assajos, però segons els estudis més recents, aquest es potenciat quan l'esforç és aplicat de forma uniaxial. És per això que aquest treball s'ha decantat per realitzar l'experimentació en assajos a microtracció. El fet de que els assajos hagin estat de microtracció és degut a que per a fer assajos de gran escala són necessaris uns recursos dels quals no es disposaven, ja que per exemple la font d'alimentació de polsos per a un assaig de tracció normal hauria d'ésser molt potent i, per tant, molt costosa.

Donat que la majoria de les teories sobre l'efecte electroplàstic emprades fins ara mostren que l'efecte atèrmic és produït degut al moviment de les dislocacions dins de l'estructura del material, en aquest projecte s'ha optat per a dur a terme una laminació en fred d' aproximadament un 50% respecte a la làmina inicial amb l'objectiu d'introduir una quantitat addicional de dislocacions dins del material emprat i incrementar així l'efecte i les probabilitats d'observar-lo.

1.1. Estat de l'art

1.1.1. *L'electroplasticitat*

L'efecte electroplàstic en els materials ha estat objecte d'estudi per a múltiples científics durant els últims 50 anys. Ara, a l'actualitat, encara s'investiga per tal de poder definir amb major claredat les condicions i els materials en els quals es produeix. Aquest fenomen comporta dos importants efectes causats per el pas del corrent elèctric: un efecte tèrmic (també anomenat efecte Joule) i un efecte atèrmic. Aquest últim sobretot ha estat el principal objecte d'estudi del fenomen electroplàstic.

Tots els materials presenten una determinada resistència quan són sotmesos a tensió. La variabilitat d'aquesta és deguda a la seva composició química i l'estructura cristal·lina que presenten. Defectes de punt, dislocacions, i defectes superficials (fronteres de gra, esquerdes, etc.) dins d'un material poden incrementar la resistència d'aquest, per això sovint es recorre a processos de deformació i tractaments tèrmics del material per tal d'obtenir les propietats desitjades. Quan un material està carregat elèctricament, les dislocacions es mouen a través d'aquests obstacles canviant de direcció, doblegant-se o desplaçant-se. Així, les dislocacions poden moure's dins del material amb menys resistència i per tant poden superar els obstacles en el pla de lliscament més fàcilment produint que aquest sigui més fàcil de deformar. Per tant, l'avantatge darrere dels polsos elèctrics es modificar les propietats dels materials de manera que les dislocacions del seu interior puguin moure's el més lliurement possible. Fent això, el material es torna temporalment més dèbil, minimitzant l'energia necessària per a mecanitzar-lo. Un altre objectiu que es persegueix amb els polsos elèctrics és incrementar el màxim possible l'elongació del material abans de la ruptura. Incrementar aquesta elongació té importants avantatges, com per exemple permetre fabricar peces de forma complexa fent servir aquest material, fent créixer la relació pes/material emprat.

A continuació s'expliquen breument els principals avenços realitzats en l'estudi d'aquest fenomen des de el seu descobriment.

1.1.2. *Models teòrics*

Els primers estudis sobre l'efecte electroplàstic datats del 1963 i elaborats per Troitskii i Likhtman (Troitskii and Likhtman 1963), van proposar la teoria que aplicant polsos de corrent elèctric a un metall es reduïa la tensió requerida per iniciar la seva deformació. En aquell cas van treballar amb Zinc, fent passar corrent durant la deformació plàstica, on van observar un important decreixement en la tensió de fluència juntament amb una important millora en la ductilitat del material. Posteriorment, aquest fenomen va ser confirmat per el mateix Troitskii (Troitskii 1969), duent-lo a la conclusió que aquests electrons conduïts podien exercir una força en les dislocacions també anomenada "electron

wind" o "vent d'electrons", i que aquesta succeïa durant el pas de corrent elèctric, donant com a resultat una variació significativa en les propietats mecàniques del material. Poc abans, però, (Kravchenko 1967) es va proposar per primera vegada aquesta teoria basada en la difusió atòmica, la qual provava el moviment de les dislocacions en metalls i semiconductors quan s'aplica un camp magnètic extern que produïa una modificació en la matriu estructural del material donant com a resultat una variació en la mida de les vacants intersticials. Aquesta força pot ser expressada mitjançant la següent equació:

$$F_{ew} = e \cdot n_e \cdot J \cdot \left(\frac{\rho}{N_D}\right) \quad (1)$$

On F_{ew} és la força de vent d'electrons per unitat de llargària de dislocació, n_e és la densitat d'electrons, J el flux total d'àtoms, ρ la resistivitat total del material i N_D la densitat de dislocacions.

Anys més tard, estudis empírics realitzats per els científics Spretcher (Spretcher et al. 1986) i posteriorment per Stanton (Stanton et al. 1994) van mostrar que hi havia certs paràmetres com la densitat de corrent, la duració del pols de corrent i la freqüència d'aquesta que influeixen directament en el comportament mecànic del material sotmès a tensió.

Una altra teoria que prova de donar explicació al fenomen electroplàstic és la del camp magnètic, proposada per Molotskii i Fleurov (Molotskii and Fleurov 1995), on es va proposar que el principal causant d'aquest fenomen era degut al camp magnètic induït a partir del corrent que s'aplica, el qual genera unes tensions que produeixen un moviment en les dislocacions del material.

En el desenvolupament dels estudis de Conrad (H. Conrad 2000) i altres investigadors dels Estats Units, es van realitzar una sèrie d'experiments per tal de determinar la magnitud i el principi físic de la interacció entre els electrons conduïts i les dislocacions quan s'aplicava corrent elèctric polsant. Aquests van demostrar que durant la electroplasticitat els àtoms metàl·lics obtenen una energia que augmenta la capacitat de vibració d'aquests, la qual provoca una reducció de l'energia d'activació en el moviment de les dislocacions i accelera el seu moviment cap a altres espais generats per defectes interns del material.

Així doncs, tenim dos grans models teòrics que intenten explicar el principi físic de l'electroplasticitat i en especial efectes atèrmics associats a aquesta: el model del "electron wind" i el del camp magnètic. Cap d'ells, però, aconsegueix descriure amb prou exactitud aquests efectes.

1.1.3. Camps d'aplicació i materials

En els últims anys s'ha estat investigant quines aplicacions pot tenir aquest efecte, on s'ha descobert a partir d'experimentacions que té un important impacte en la indústria metal·lúrgica (Guan L. et al. 2010), essent una eina útil per assistir processos de conformat amb deformació plàstica o mecanitzat, com ara doblegat de xapa (A. J. Sánchez et al. 2014), laminat (X. Li et al. 2014), forjat (J. T. Roth et al. 2007) i trefilat (G. Tang et al. 2000). L'any 2009 (Green

2009) afirmava que pot ser útil en aquest àmbit degut a que pot ajudar a reduir o eliminar la recuperació elàstica en aquests tipus de processos aplicant un simple pols d'alta corrent en el moment final de deformar-se el material. Cal tenir en compte, però, que aquest fenomen no està present de la mateixa manera en tots els metalls i, de fet, està estretament relacionat amb el tipus de material. Actualment se sap que dóna bons resultats en materials amb estructura FCC (Cúbica Centrada en les Cares) com ara el coure (J. Fan et al. 2013) i l'alumini (W. A. Salandro et al. 2014), però recentment s'han dut a terme estudis amb materials d'estructura hexagonal (HCP) com el titani (Margaree et al. 2013) i el magnesi (Kai, L. et al. 2015).

1.2. Objecte del projecte

D'acord amb les teories sorgides sobre l'electroplasticitat, en aquest projecte es durà a terme un estudi sobre l'efecte que provoca el corrent elèctric en les propietats mecàniques d'un alumini AW1050 H14 mitjançant assajos de microtracció per tal de poder definir els efectes atèrmics produïts per aquests. Partint d'aquesta base s'han establert els següents objectius que persegueix el present projecte:

- ❖ Millorar el procediment d'assaig i l'anàlisi de provetes de microtracció per tal de poder facilitar tasques futures.
- ❖ Determinar les diferències a nivell de propietats mecàniques entre les dues direccions d'assaig respecte a la laminació.
- ❖ Analitzar les possibles diferències entre les provetes assajades amb corrent i les que han estat assajades en condicions normals.

CAPÍTOL 2:

METODOLOGIA

EXPERIMENTAL

2.1. Fabricació de les mordaces

Prèviament a l'elaboració de les mostres, per a la realització dels assajos de microtracció d'aquest projecte s'han dissenyat i fabricat al taller mecànic de la EUETIB, unes noves mordasses especials per a assajos de microtracció (Veure plànols al Volum II) amb l'ajuda de l'Adrià Fernández. La finalitat que es persegueix amb això és millorar el procediment d'assaig i amb això l'obtenció de dades respecte a dissenys anteriors a aquest projecte. Aquestes han estat dissenyades d'acord amb els següents criteris:

- **Conductivitat.** Les mordaces s'han de poder fer servir en assajos amb corrent, per la qual cosa han de ser d'un material que sigui bon conductor elèctric.
- **Ergonomia.** Per a poder introduir-les i retirar-les de la màquina de manera fàcil i còmode, especialment la part superior d'aquestes, que és la que contacta directament amb la màquina.
- **Mesures.** Aquestes mordasses han de complir unes dimensions determinades per a poder assajar provetes de microtracció.
- **Protecció.** Ja que aquestes han de subjectar les provetes a assajar, han de protegir el màxim possible les mostres per tal d'evitar que siguin sotmeses a esforços no desitjats que poguessin perjudicar els resultats.

- **Centrat.** Per a poder obtenir un bon processat d'imatges és necessari que la mostra a assajar estigui completament perpendicular a la càmera encarregada de captar les deformacions, ja que així s'eviten irregularitats en la correlació de dades.

Aquests criteris però, han estat definits a partir de punts febles sorgits en dissenys anteriors d'altres projectes on també es van realitzar assajos de microtracció. En concret s'han observat les mordaces dissenyades en el projecte de la Sílvia García (*Determinació de propietats mecàniques en làmines d'alumini de gra nanocrystal·lí*) i les del projecte d'en Xavier Romero (*Analysis of the effects of heat treatments on electroplasticity of AA6082*). A continuació és fa un breu anàlisi d'ambdós dissenys i s'expliquen les modificacions implementades en el disseny realitzat en aquest projecte. Abans però, s'han definit dels trets comuns en tots els dissenys:

- ❖ El disseny estarà format per una mordassa superior i una inferior, on aniran fixats els extrems de la proveta.
- ❖ La mordassa inferior anirà subjectada a la màquina mitjançant un passador.
- ❖ La mordassa superior anirà roscada a la part superior de la bancada de la màquina.
- ❖ Les provetes aniran fixades a les mordasses mitjançant cargols que es faran passar per els forats de que disposen.
- ❖ Tant la mordassa superior com inferior seran fabricades amb alumini, principalment per tres raons: és un material econòmic, bon conductor i a la vegada és lleuger.
- ❖ Tots els models disposaran d'un utilatge (en aquest treball s'ha anomenat armadura) per a fixar les mordasses i col·locar la proveta de manera que quedi protegida de possibles esforços. Aquesta en tots els models ha estat fabricada amb acer donada la seva resistència.

DISSENY XAVIER ROMERO

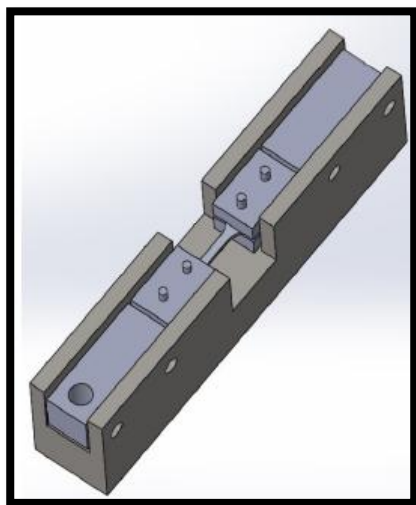


Figura 1. Disseny Xavier Romero.

Inconvenients:

- Mobilitat reduïda en la mordassa inferior, fet que dificulta la realització de la precàrrega anterior a l'assaig.
- Desviació en el centrat de la mordassa superior deguda al desajust del roscat amb la màquina.

Avantatges:

- Bona conductivitat, disposen d'una línia com a superfície de contacte amb el passador
- Tancament senzill i segur per a immobilitzar les provetes de microtracció.

DISSENY SÍLVIA GARCÍA



Figura 2. Disseny
Sílvia García.

Inconvenients:

- Tancament complex. Al ser dissenyades per a un tipus de provetes molt fràgils, aquestes eren fixades amb 8 cargols, fet que dificultava l'extracció i col·locació de les mostres.
- Baixa conductivitat degut a que únicament disposa d'un punt de contacte entre la mordassa inferior i el passador.

Avantatges:

- Bona mobilitat gràcies a un càncam situat en la mordassa inferior, aquest permet que a l'hora de realitzar la precàrrega de la màquina la mostra no pateixi esforços.
- Disseny compacte, amb curta longitud i una secció ample que facilita la seva manipulació.

SOLUCIONS ADOPTADES

- ❖ Ampliació de la zona de contacte amb l'útilatge superior de la màquina, això permetrà un bon centratge degut a la repartició dels esforços en la superfície de contacte, alhora que contribuirà a una millor conducció del corrent.
- ❖ El contacte de la mordassa inferior amb el passador, com en el disseny del Xavier Romero, serà mitjançant una línia (Figura 3a), això en reduirà la mobilitat però ajudarà a conduir millor el corrent en aquesta part.
- ❖ L'extrem de la mordassa superior serà cilíndric per a poder col·locar i retirar el conjunt amb facilitat.
- ❖ Les provetes aniran fixades a les mordasses amb un cargol M2 a cada extrem.
- ❖ Fixació de les mordasses amb la armadura mitjançant 4 cargols M4 (Figura 3a i 3b).

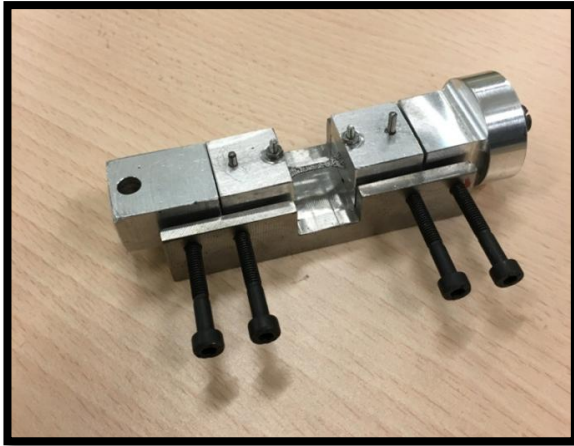


Figura 3a. Imatge del conjunt armadura-mordaces.



Figura 3b. Imatge de la composició de les mordaces.

2.2. Material base

El material escollit per a aquesta experimentació ha estat un alumini AW1050 H14 en forma de xapa laminada. El principal motiu d'aquesta elecció és perquè aquest té una alta puresa (99.62% segons el fabricant), pròpia dels aluminis de la sèrie 1XXX, contenint com a principals impureses silici i ferro, i amb una petita quantitat de zinc i titani segons el fabricant (Taula 1). Com a característiques d'aquest, d'acord amb la norma UNE-EN 515: 1993, al ser de la sèrie H1X es sap que les propietats mecàniques d'aquest han estat aconseguïdes mitjançant un últim procés de deformació en fred per tal d'obtenir la resistència mecànica desitjada (acritud). La segona xifra, en aquest cas dona informació sobre el grau d'acritud del material, en aquest cas la seva resistència a la tracció es troba aproximadament a la meitat entre la del estat de recuit i la de dur, donant lloc a un material relativament dur tot i la seva puresa. Degut a la seva composició, aquest és un material relativament tou dintre dels aluminis, això farà que a l'hora de mecanitzar s'hagi d'anar amb especial precaució per tal d'evitar arrancar més material del degut.

S'ha partit d'una xapa de 1x1000x2000 mm subministrada per el fabricant AMPLA S.L., de la qual es van tallar mitjançant una cisalla pneumàtica industrial 5 làmines de 30 mm d'amplada per tal de facilitar el mecanitzat posterior.

Taula 1. Composició química del Alumini AW1050 H14 base segons el fabricant.

Material	Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Cr%	Zn%	Ti%	Al%
Al1050	0,1	0,25	0	0	0	-	0,01	0,02	99,62

La següent taula (Taula 2) mostra les propietats físiques del alumini emprat. Com es pot observar és un material amb baixa densitat i per tant, lleuger. També presenta una bona conductivitat tèrmica i una baixa resistivitat elèctrica, fet que pot afavorir l'aparició del fenomen electrolàstic, ja que no presenta gaire resistència al corrent elèctric.

Taula 2. Propietats físiques del Alumini AW1050 H14 base segons el catàleg Alustock.

	Densitat (kg/m ³)	Conductivitat tèrmica (W/m·K)	Resistivitat elèctrica (nΩ·m)	Mòdul elàstic (GPa)	Coefficient de dilatació (μm/mK)
UNE 38114:2000	2,7	229	29	69	23,5

La Taula 3 mostra la comparativa entre les propietats mecàniques de l'alumini emprat segons la norma UNE 38114: 2000 i segons el certificat subministrat per el fabricant. Com es pot observar, aquest compleix el llinar fixat per la norma per a un alumini H14 amb un gruix de xapa d'entre 0,5 i 1 mm. La duresa no ha estat facilitada per el fabricant i el valor reflectit en la norma és merament orientatiu, és per això que s'ha optat per realitzar una sèrie d'assajos de duresa que permetran determinar-la experimentalment. Aquests assajos es realitzaran mitjançant l'assaig Vickers, i els resultats obtinguts seran especialment importants de cara a la laminació per a poder visualitzar quant ha endurit el material després de deformar-lo en fred.

Taula 3. Propietats mecàniques del Alumini AW1050 H14 base segons el fabricant.

	Duresa (HBS)	Resistència a la tracció Rm (MPa)	Límit elàstic Rp 0,2 (MPa)	Elongació (%)
Fabricant	-	123	117	5,1
UNE 38114: 2000	34	105-145	≥85	>3

2.2.1. Procés de laminació

Com s'ha comentat en la introducció d'aquest projecte, prèviament als assajos, i una vegada obtingudes les làmines de xapa necessàries per a fabricar les provetes, aquestes han estat deformades en fred mitjançant una laminació al laboratori PROCOMAME de l'EUETIB. Aquesta s'ha dut a terme amb una laminadora LMTD-100 (Figura 4) seguint el Protocol de re-adreçament de làmines redactat durant aquest projecte (Annex A) per tal d'introduir-hi un nombre addicional de dislocacions al material.

Abans de la laminació però, les xapes inicials van ésser tallades per la meitat per facilitar aquest procés, ja que la màquina emprada era de mida reduïda i si es feien servir làmines de gran llargària la probabilitat de que sorgissin doblecs en el material era major. Aquestes van ser deformades aproximadament un 50% respecte al material inicial (Taula 4), tot fent passades progressives per tal d'evitar reduccions brusques i garantint així el correcte funcionament de la màquina. Val a dir però, que moltes de les làmines s'han hagut de desestimar degut a un excés de deformació, per defectes en l'alineament, o per l'aparició de doblecs en la superfície d'aquestes, ja que al ser un procés manual el marge d'error era molt alt. Com es pot veure en la Taula 4 abans mencionada, únicament es van poder aprofitar un 40% de les làmines deformades.

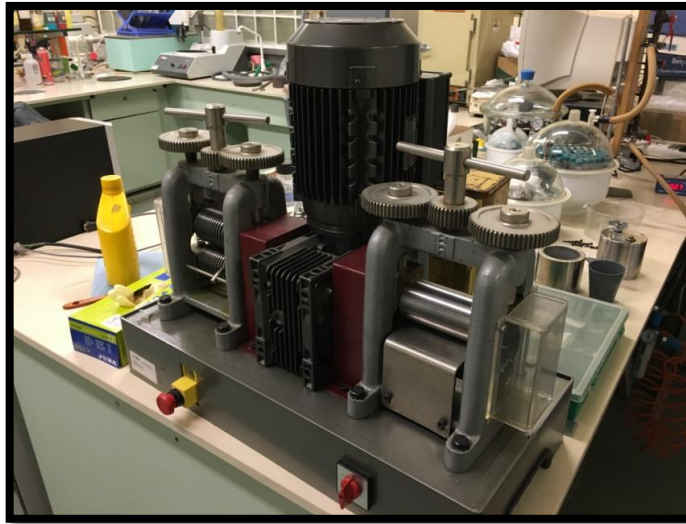


Figura 4. Laminadora model LMTD-100 del laboratori PROCOMAME de l'EUETIB.

Taula 4. Deformacions obtingudes després de la deformació en fred.

N.º de laminació	Gruix (mm)	Deformació (%)	Deformació vàlida
1	0,49	51	NO
2	0,52	48	SI
3	0,51	49	SI
4	0,53	47	SI
5	0,47	53	NO
6	0,52	48	SI
7	0,46	54	NO
8	0,48	52	NO
9	0,52	48	NO
10	0,45	55	NO

2.2.2. Determinació de la duresa

Posteriorment al laminat, s'ha procedit a fer una sèrie d'assajos de microduresa Vickers mitjançant un microduròmetre Buehler Micromet 5114 (Figura 5) i seguint el Protocol de determinació de duresa (Annex B) redactat per l'exalumne Cristian Narváez. El principal objectiu que es persegueix amb això és determinar la duresa del alumini un cop deformat i veure les diferències obtingudes respecte al material inicial. Aquests assajos doncs, s'han realitzat sobre dues xapes: una obtinguda a partir d'una de les làmines deformades i l'altre obtinguda del material base. A la Taula 4 es poden observar les diferències entre les dureses d'ambdós materials en escala Vickers. El microduròmetre emprat conté 13 intervals de càrrega compresos entre 0,1 i 20 N però en aquest cas, per a les dues xapes s'ha emprat la mateixa força, exercida per una càrrega de 2 kg d'acord amb la norma UNE-EN ISO 6507-1:2006 per a un alumini AW1050 H14 amb gruix de làmina de 1 mm en el cas del material base i de 0,5 mm per al material laminat.



Figura 5. Microduròmetre Buehler Micromet 5114.

Per facilitar la determinació de la duresa s'ha fet servir la plantilla de "Càlcul de microduresa Vickers", creada per el personal de departament de CMEM per tal de facilitar-ne el càlcul. Únicament es llegeix la lectura de les dues diagonals i s'anota en la plantilla (Figura 6), tot seguit, aquesta retorna el càlcul de la duresa en Vickers, obtingut a partir de l'equació (2) següent:

$$HV = \frac{2 \cdot F \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} \quad (2)$$

Nom de la mostra

ALUMINI 1050 H14

Càrrega

Objectiu emprat

Mesures de les diagonals

Valor promig de duresa

Mostra	d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (µm)	HV	Operari	APM
287,10	302,10	294,60	42,7			
306,10	296,90	301,50	40,8			
303,80	297,80	300,80	41,0			
294,80	306,50	300,65	41,0			
306,50	301,20	303,85	40,2			
308,50	302,60	305,55	39,7			
295,90	316,40	306,15	39,6			
310,50	311,90	311,20	38,3			
321,20	309,40	315,30	37,3			
300,50	309,90	305,20	39,8			

N	tp (95%)
1	12,7062
2	4,30265
3	3,18245
4	2,77645
5	2,57058
6	2,44691
7	2,36462
8	2,306
9	2,28216
10	2,26216
11	2,24645
12	2,23303
13	2,22143
14	2,21074
15	2,20094
16	2,19191
17	2,18362
18	2,17602
19	2,16909
20	2,16271
21	2,15686
22	2,15152
23	2,14666
24	2,14226
25	2,13831
26	2,13479

Objectiu	O.N.
10	0,25
50	0,65
100	0,95

pendent	Valor	Error
pendent	1,00000	0,00100
Inter. (µm)	0,00000	0,10000

λ (µm)	Valor
λ (µm)	0,40

Resolució òptica (µm)	Valor
Resolució òptica (µm)	0,80

Mesures bones	Valor
Mesures bones	10

HV	Error
HV	40,0
Error	1,5

Duresa	Valor
Duresa	43,0703
Max	42,7327
Min	37,3059
<σ>2S	37,0164
Desviació	1,51347
Error Accp	1,08268
Error Res	0,46014
F(N)	19,6133
Constant	0,18909
Gravetat	9,80665

Figura 6. Plantilla per al càlcul de microduresa Vickers.

A la Taula 4 es poden observar els resultats obtinguts a partir dels assajos de Vickers per ambdues làmines. Per tal de verificar el resultat s'han realitzat un total de 10 indentacions amb les seves corresponents mesures per a cada làmina.

Taula 4. Comparativa de resultats de l'assaig Vickers.

Material	Duresa (HV)
Alumini 1050 H14	40 ±1,1
Alumini 1050 H14 laminat	41,5 ±1,1

2.3. Preparació de les mostres

Durant aquest treball s'han fabricat un total de 67 provetes de microtracció (Figura 7), de les quals 7 han hagut d'ésser desestimades durant els assajos degut a diversos problemes tècnics sorgits durant la realització d'aquests. Totes elles però, han estat fabricades d'acord amb els protocols establerts en el laboratori PROCOMAME, el procediment dels quals s'explica de manera resumida a continuació.

Com s'ha mencionat anteriorment, en aquest projecte s'estudiaran 2 tipus de mostres depenent de l'angle en que seran assajades respecte a la laminació. Partint de la base de que aquestes sempre seran assajades longitudinalment a tracció, han estat tallades en la direcció perpendicular i paral·lela a aquesta. Amb això es pretén comparar el comportament que presenten les mostres depenent de la direcció en que es deforma la xarxa cristal·lina del material. La resistència del material en ambdós deformacions a priori ha de ser diferent, presentant més resistència quan es deforma perpendicularment a la direcció de laminació, ja que el material presenta un major nombre de grans i per tant més fronteres de gra, a diferència de la direcció paral·lela, on el nombre de grans es menor i aquests seran més allargats degut a la deformació aplicada. A partir d'aquest punt fins al capítol final d'aquest projecte aquestes dues direccions seran designades com a DL per a la direcció longitudinal (0°) i com a DT per a la direcció transversal (90°) de la deformació respecte al laminat.

El mecanitzat ha estat dividit en 4 etapes. En la primera es realitzarà un marcatge i tall de la xapa obtenint petites porcions rectangulars; el següent pas serà fer el trepanat d'aquestes en els punts on aniran subjectades per les mordasses de la màquina; un cop enllestits els forats, el següent pas serà mecanitzar les mostres mitjançant una fresa copiadora i, per últim, treure la possible rebava que s'hagi produït durant el mecanitzat.

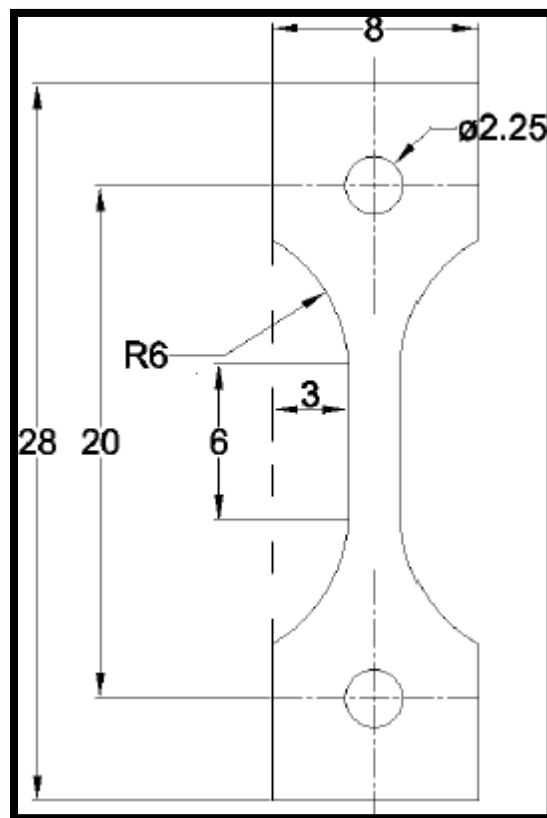


Figura 7. Proveta de microtracció.

2.3.1. Mecanitzat

El procés de mecanitzat de les mostres ha estat realitzat íntegrament a les instal·lacions de la EUETIB, seguint el protocol de mecanitzat de provetes de microtracció redactat per l'Adrià Fernández (Annex C) es pot dividir aquest en 4 apartats d'acord amb les operacions realitzades:

1. **Marcatge i tall:** a partir de les làmines inicials d'amplada de 29 mm, amb l'ajuda d'una esquadra, un peu de rei i un puntxó, aquestes van ser marcades per tal d'aconseguir unes mesures de xapa de 9x29 mm que posteriorment es van tallar al taller mecànic de la universitat amb una ciselladora (Figura 8). Aquests talls van ser realitzats de manera unitària per a poder garantir les mesures desitjades i evitar d'aquesta manera una acumulació d'error, ja que aquest també era un procés manual i la precisió depenia en gran mesura de l'operari. Es va seguir el mateix procés tant per les mostres de DL com per les de DT, on l'única variació va ser en la direcció del tall.



Figura 8. Tall de mostres amb ciselladora.

2. **Trepanat:** una vegada obtingudes les xapes tallades, amb l'ajuda d'un retolador permanent i una proveta a mode de plantilla, es van marcar els punts on s'haurien de fer els forats, on posteriorment anirien agafades les mordaces durant l'assaig. El següent pas va ser fer aquests en el laboratori PROCOMAME de la EUETIB amb l'ajuda d'un trepant de columna (model PRACTYL-EJ4113N) i emprant un fresolí de 2 mm de diàmetre. Les mostres es van col·locar en una matriu d'alumini i una placa de metacrilat especials per a aquesta operació que prèviament van ésser fabricades en el taller mecànic, tot el conjunt va ser fixat amb uns passadors de 2 mm

de diàmetre introduïts en els forats de la matriu i el metacrilat juntament amb unes brides que fixaven aquest últim contra la matriu d'alumini, tal com mostra la Figura 9, immobilitzant així el conjunt i evitant els possibles lliscaments de la xapa produïts durant el trepanat.

Una vegada muntat el conjunt i fixat en la bancada de la màquina, el més difícil va ser fer el primer forat de cada xapa, ja que les vibracions produïdes al trepanat provocaven que la xapa llisqués, dificultant d'aquesta manera la precisió de la operació. Per tal d'evitar l'excés de rebava generada durant l'operació es va optar per fer trepanar de manera ràpida, amb la qual cosa hi havia menys fricció amb el material i per tant, temperatures més baixes. Calia tenir en compte però, que el fet de fer baixar el trepant amb un excés de velocitat podia donar lloc a una ruptura del metacrilat i/o una possible deformació de la proveta a causa del impacte del fresolí amb aquesta.



Figura 9. Trepanat de les mostres.

3. **Fresat:** per a tal de donar a les mostres la forma final desitjada, es va fer servir una fresa copiadora situada al taller mecànic (Figura 10a), ja que és molt útil per a operacions en les que s'ha de repetir el mateix patró de contorn en totes les mostres. Com a utilitat per a la copia del disseny de la proveta va ser emprada la mateixa matriu que usada durant el procés de trepanat, amb l'única variació de la part superior, que en aquest cas també serà d'alumini (Figura 10b). Com en el trepanat, tot el conjunt anirà fixat amb passadors. Com a gran avantatge respecte al trepanat, aquest procés permet mecanitzar fins a 6 mostres al mateix temps, cosa que va agilitzar el procés. Una vegada col·locades totes les mostres a la matriu, van ser mecanitzades seguint els passos del protocol abans comentat, el qual recomana mecanitzar sempre d'esquerra a dreta per a tal d'aconseguir un millor acabat final i evitar l'excés de rebava. Durant els primers mecanitzats es va observar que la màquina treballava a massa potència d'acord amb les necessitats que es requerien, donant lloc a mostres malmeses degut a les altes temperatures que es produïen. Per a poder

controlar aquest fet i regular de forma manual la velocitat de la màquina es va optar per fer servir un variador de potència (part esquerra de la Figura 10a) model HC-213.

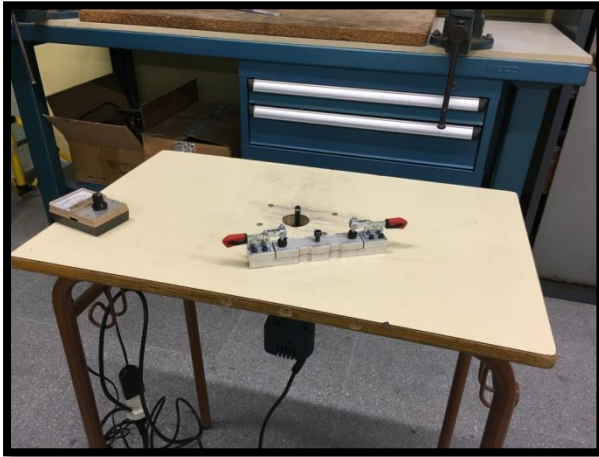


Figura 10a. Fresa copiadora emprada en el mecanitzat.

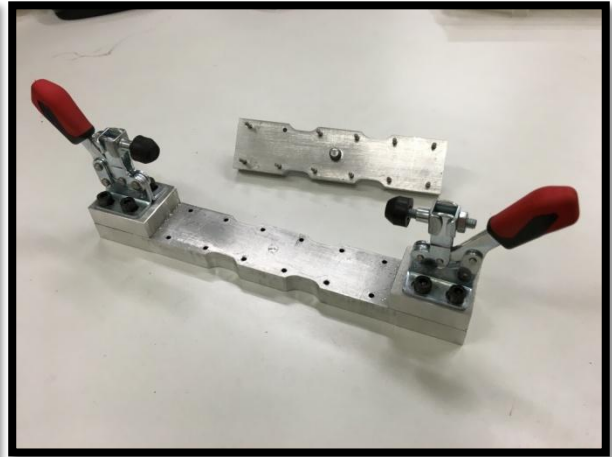


Figura 10b. Matriu d'alumini per a provetes de microtracció.

4. **Desbast:** finalment, per acabar amb el mecanitzat de les provetes es va procedir a fer un desbast d'aquestes per tal d'eliminar les petites porcions de material que puguin haver quedat en forma de rebava produïda durant el mecanitzat a causa de l'escalfament i l'arrencament de material. En aquesta part s'haurà d'anar amb especial alerta, ja que si es desbasta més del compte no es podrà garantir el compliment de les mesures normalitzades i aquest fet pot influir molt negativament en l'anàlisi de dades posterior a l'assaig.

Degut a la mida reduïda de les provetes, es va optar per no fer lliscar aquestes sobre paper abrasiu ja que la quantitat de material extret podria ser excessiva. Per tant es van retallar petites porcions de paper abrasiu i es van adherir a una espàtula corbada amb cinta adhesiva, ja que d'aquesta manera es podia extreure la rebava únicament de les zones on la quantitat de material sobrant era excessiva (Figura 11).

Es va optar per començar desbastant amb paper abrasiu P600 per eliminar les rebaves més voluminoses, ja que aquest, al tenir major mida de gra la fricció i per tant l'arrencament de material era més gran. Quan ja no es va observar aparentment rebava en la proveta es va continuar el desbast amb el paper de gra més fi del que es disposava per a garantir un bon acabat final, que en aquest cas era el P1200, sempre amb l'ajuda de la lupa binocular (Figura 13) ja que al ser mostres de mida reduïda no es podien veure les petites rebaves a simple vista.

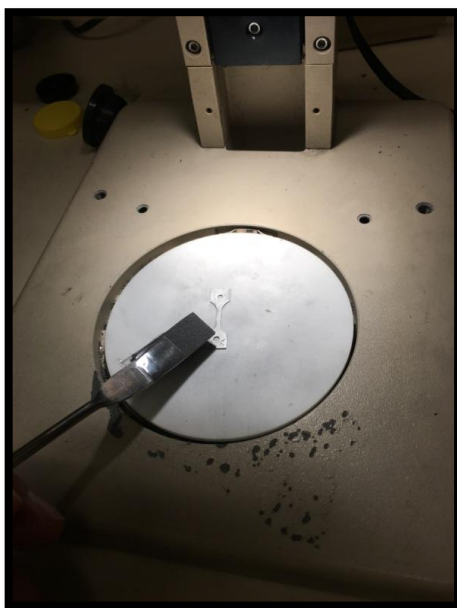


Figura 11. Desbast d'una de les cares d'una proveta.

2.3.2. Metrologia i identificació de les mostres

Una vegada acabat el procés de mecanitzat, el següent pas va ser fer la metrologia de totes i cadascuna de les mostres per tal de calcular la secció de la seva part plano-paral·lela i anotar les seves imperfeccions, en el cas que n'hi hagués. En aquest procés es va seguir el "Protocol de Metrologia v2" (Annex D) redactat per la Sílvia Garcia i, per tal d'agilitzar el procés es va emprar el full de càlcul "Videotracció", creat per el personal del departament de CMEM a mode de plantilla per anotar els resultats. Abans de tot però, es van numerar les provetes per tal de poder-les diferenciar entre elles. En aquest cas, es va optar per una nomenclatura d'acord amb les condicions en que aquestes serien assajades i la direcció respecte a la laminació en la qual serien assajades, tal com es pot observar en la Figura 12.

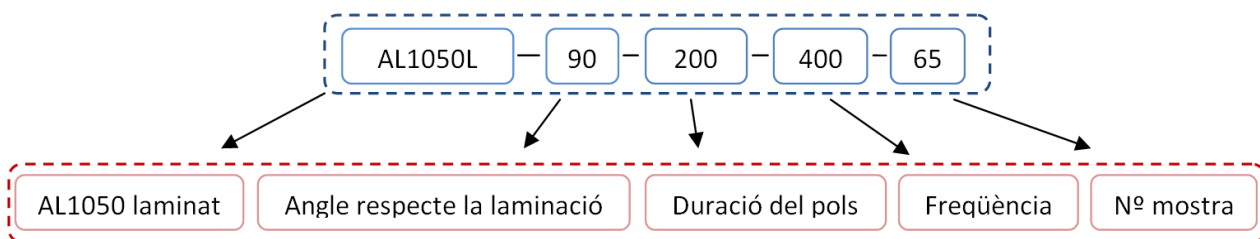


Figura 12. Esquema de nomenclatura de les mostres.

Bàsicament la metrologia es va centrar en mesurar l'amplada i l'espessor de la part central plano-paral·lela o canya de les provetes, ja que és la que s'estudiarà posteriorment, per tant, es van prendre diverses mesures de la seva amplada i del seu gruix, a partir de les quals la plantilla retornava el càlcul de la secció tal com mostra la Figura 15.

- **Gruix:** La mesura del gruix es va realitzar amb un palmer de precisió digital model MAHR Micromar 40 EXL, el qual anava fixat amb una bancada de taula (Figura 14a). Es van realitzar un mínim de 3 mesures per proveta que s'anotaven directament a la plantilla.



Figura 13. Lupa binocular Motic SMZ-168 amb càmera.

- **Amplada:** Pel que fa a l'amplada de la canya es va mesurar amb l'ajuda d'una càmera Moticam 2300 de 3 megapíxels que anava roscada a la part superior de la lupa binocular Motic SMZ-168 del laboratori (Figura 13). La mostra a mesurar anava col·locada tal com mostra la Figura 14b sobre un peu de rei, i a partir de la imatge obtinguda. Amb l'ajuda del programa GIMP, com en el la mesura dels gruixos, a partir de la imatge obtinguda per la càmera es van fer un mínim de 3 mesures per proveta dels píxels que conformaven l'amplada de la canya. Aquests valors s'anotaven a la plantilla i aquesta senzillament realitzava un càlcul de conversió de píxels a mil·límetres de la imatge, retornant el valor en mil·límetres de l'amplada.

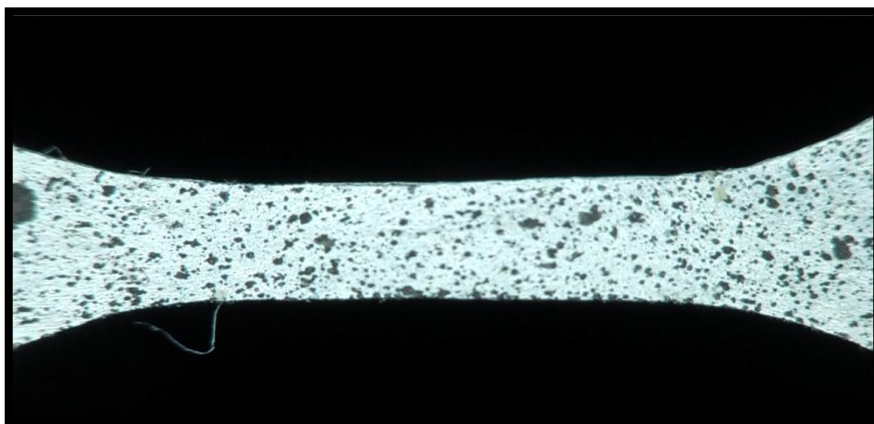


Figura 16. Cara pintada d'una proveta de microtracció.

2.4. Assaig de microtracció

Com s'ha esmentat abans, durant aquest projecte s'han fabricat un total de 67 provetes i d'aquestes però, només 60 han estat assajades a microtracció. Aquestes han estat dividides d'acord amb els següents criteris:

- Direcció de mecanitzat respecte a la direcció de laminació (DL i DT).
- Velocitat d'assaig.
- Si eren sotmeses a polsos de corrent elèctric durant l'assaig o no.

Així doncs, s'han fabricat un total de 30 mostres amb una direcció de mecanitzat DT i les 30 restants en una direcció perpendicular DL. Per a cada direcció s'han realitzat 3 assajos en tandes de 10 provetes, amb una velocitat d'assaig diferent en cada tanda (1,58 mm/min, 5 mm/min i 15,81 mm/min). A la vegada, cada assaig de 10 provetes ha estat dividit en 5 mostres assistides amb corrent i 5 en condicions normals amb l'objectiu de poder comparar les diferències entre aquestes per a cada velocitat.

Les velocitats d'assaig es van determinar a partir dels resultats obtinguts en el treball de l'Àlex Domínguez, en el qual va trobar resultats prometedors entre les velocitats d'assaig de 0,5 mm/min i 50 mm/min, és per això que s'han escollit com a velocitats d'estudi 3 valors continguts en aquest rang.

A continuació es detalla els passos que s'han seguit en el procés de muntatge de la màquina, necessari per a dur a terme un assaig de microtracció, juntament amb el posterior assaig i processat de dades realitzat per a totes i cada una de les mostres fabricades. Per a la realització dels assaigs s'ha seguit el protocol d'assaig de provetes de microtracció elaborat per la Sílvia García i modificat en aquest projecte per a adequar-lo per assajos amb corrent i emprant les noves mordasses comentades en apartats anteriors. Aquests assajos es van poder realitzar gràcies a l'ajuda d'en Jordi Llumà i la Sílvia García ja que van actuar com a operaris durant aquests.

2.4.1. Preparació de la màquina i assaig

Un cop assecades les provetes, s'ha procedit a assajar-les a la màquina Microtest model EM1/20/FR i amb capacitat per exercir forces de fins a 20kN, situada al

laboratori de Materials 2. Durant l'assaig s'han controlat la càrrega aplicada i la velocitat d'assaig amb l'ajuda d'un ordinador de sobretaula mitjançant el programa SMC-3000. Per captar les forces a les que han estat sotmeses les mostres s'ha roscat a la bancada superior de la màquina una cel·la de càrrega, la qual obté aquests paràmetres mitjançant una unitat de digitalització de dades (Spider 8) controlada per el software Catman, que mostrarà en pantalla la força aplicada en funció del temps en forma de gràfic. Inicialment es va optar per fer servir la cel·la S9M de fins a 2kN de força, però a partir del segon assaig, veient que la força màxima que suportaven les provetes era inferior a 200N, es va decidir canviar aquesta per la S9M de 500N, ja que de les que es disposaven al laboratori és la que garantia una major precisió en l'obtenció de dades.

Per a captar les deformacions produïdes en l'eix X i Y de les provetes, es va aplicar la tècnica de correlació digital d'imatges, en la qual a partir de les imatges obtingudes es poden extreure les deformacions a les que és sotmès el material. És per això que durant l'assaig es va fer servir una videocàmera digital (Casio Exilim model EX-F1) muntada sobre un trípode calibrat de manera que estigués el més centrada possible respecte a la proveta a assajar, tal com mostra la Figura 17. Aquesta realitzava una gravació de vídeo en alta definició de l'assaig que posteriorment era dividit en fotogrames i analitzat. Per tal de maximitzar l'enfocament d'aquesta es van adherir una sèrie de llums LED al voltant de l'objectiu de tal forma que la càmera únicament mostrés la part de la proveta que es volia analitzar, deixant-la en un fons d'imatge negre i evitant així incoherències en l'algorisme de processat utilitzat posteriorment.

Inicialment es va optar, com en els treballs anteriors, per definir la zona d'anàlisi enfocada per la càmera incloent els extrems de la proveta (Figura 16) ja que en els canvis de radi era on podien concentrar-se més probablement les tensions. Al veure que les tensions es produïen de manera generalitzada en la canya de la proveta, durant els últims assajos (els de DT respecte a la laminació) es va decidir ampliar l'enfocament de la càmera en aquesta zona (Figura 20a), amb la qual cosa es conseguia una millor obtenció de dades ja que permetia definir amb més precisió la malla.



Figura 17. Muntatge de la càmera.

Per a les mostres assajades amb polsos de corrent es va emprar una font d'alimentació de polsos de corrent contínua connectada a la part superior i inferior del sistema de subjecció de les mordaces i correctament aïllada respecte a la màquina. Aquests polsos eren controlats en tot moment amb un oscil·loscopi, juntament amb un multímetre que s'encarregava de mesurar la freqüència d'aquests. Únicament es va emprar la font en l'assaig de determinades mostres, el temps restant la font va restar desconnectada. En la Figura 18 es pot observar en detall el muntatge.

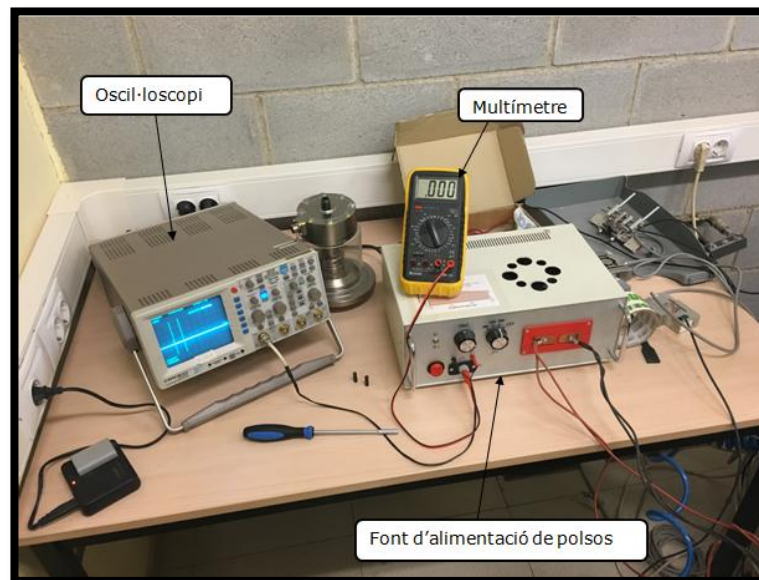


Figura 18. Muntatge de la font d'alimentació de polsos elèctrics.

Per últim, una vegada muntada la mostra a la màquina, aquesta era sotmesa a una precàrrega inicial (entre 7N i 14N aproximadament) per a poder assegurar el centrat d'aquesta, evitar possibles recol·locacions durant l'assaig que poguessin afectar en els resultats i garantir així un estat de tensió uniaxial. Tots els paràmetres obtinguts anteriorment eren recollits dins del full de càlcul "Assaigs" de la plantilla "Videotracció" emprada en l'apartat de Metrologia i identificació de les mostres. Per a sintetitzar el procés d'assaig s'ha realitzat un esquema que explica els passos seguits durant aquest en les mostres assajades amb corrent (Figura 19).

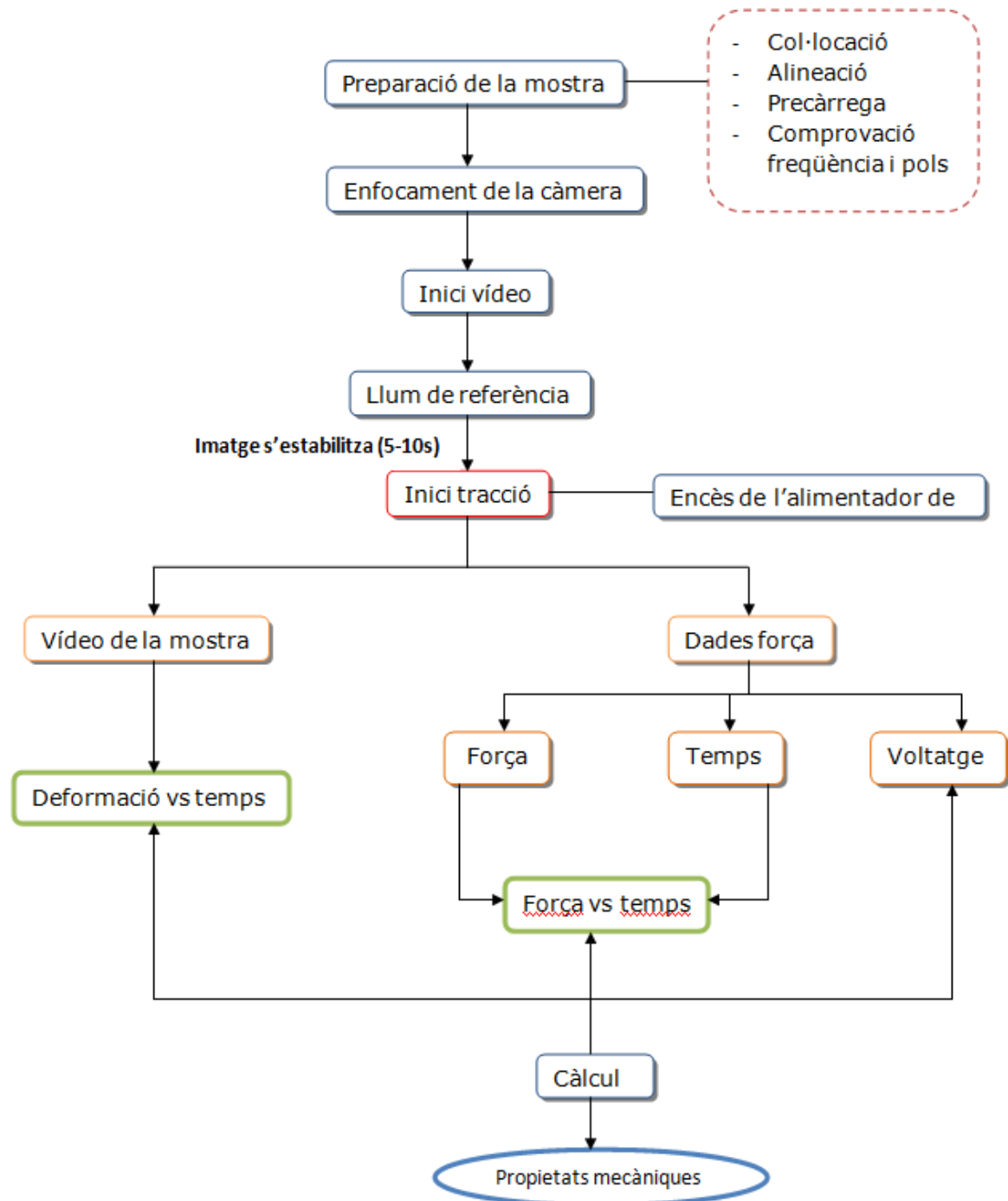


Figura 19. Esquema d'etapes per a dur a terme un assajos i el seu posterior anàlisi de dades.

2.4.2. Processat de dades

D'acord amb la tècnica de correlació digital de dades, una vegada obtingut el vídeo de l'assaig aquest era dividit en fotogrames mitjançant el programa Video2foto. A partir d'aquestes imatges, amb l'ajuda del programa MATLAB 2014b, aquestes eren analitzades gràcies a unes rutines informàtiques del programa dissenyades i millorades per el personal del departament de CMEM, les quals s'expliquen a continuació. El protocol seguit per a aquest apartat ha estat el de "Processat de video" (Annex F), redactat per l'Adrià Fernández.

- **Sincronitza_traccio:** genera un arxiu .txt a partir dels fotogrames que componen l'assaig i l'arxiu de text obtingut amb el CATMAN on es mostren els valors de la força aplicada i el temps. Aquest nou arxiu mostrarà les dades de sincronisme de l'assaig, com ara el fotograma d'inici i final de l'assaig, inici i final del vídeo, moment de ruptura, etc.
- **Grid_generator:** aquesta rutina serveix per a definir la malla de punts al voltant de la proveta per al posterior anàlisi d'aquesta. Hi ha diversos tipus de malla, però en aquest treball s'ha emprat una malla rectangular (Figura 20a), ja que la secció a analitzar és plana i serà la que més precisió ens donarà.
- **Automate_image_mp_2014:** és la rutina encarregada de fer el processat dels punts de la malla en funció dels fotogrames d'assaig. Aquesta és l'operació que porta més temps, depenent del nombre de fotogrames del que disposem, ja que analitza la malla fotograma a fotograma.
- **Displacement:** realitza el càlcul dels desplaçaments en X i en Y dels punts que conformen la malla que s'ha definit en el grid_generator i genera un arxiu .txt per a les deformacions en l'eix X i un per a les de l'eix Y. Com a avantatge, permet esborrar de la malla els punts que no ens interessin estudiar per a poder centrar el càlcul en la zona de major deformació (Figura 20b).
- **Crea_corba_tracció:** a partir dels arxius de les deformacions en X i Y, i introduint la secció de la proveta estudiada, retorna un sol arxiu .txt amb les dades de temps, tensió real, i deformacions X i Y.

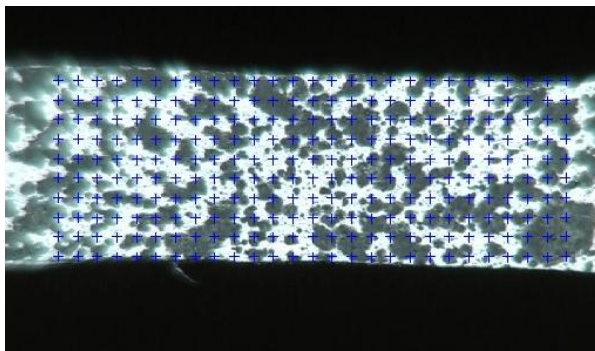


Figura 20a. Malla rectangular per a una proveta.

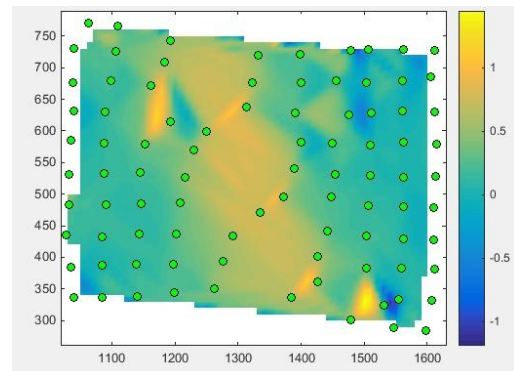


Figura 20b. Malla corregida.

Malgrat que les rutines emprades són les que tot just acaben de ser mencionades, en el tram final d'aquest projecte, des de el departament de CMEM es van elaborar 3 rutines noves per tal de millorar el mètode actual de processat de dades, les quals actuen com a substitutiu de les rutines "displacement" i crea_corba_traccio (Figura 21). A continuació es descriu el funcionament d'aquestes:

- **Filtra_exlim i correcció_deformació:** corregeixen les incoherències en les deformacions obtingudes i els possibles desalineaments de la proveta respecte a la malla de punts, després genera un arxiu .txt amb la

deformació X i un altre per a la deformació Y. Com a limitació d'aquestes, el filtra-exlim està limitat a un mínim de 600 fotogrames i per tant no podrà aplicar-se en tots els assajos.

- **Genera_corba_tracció:** actua de la mateixa forma que la rutina "crea_corba_traccio" però amb les dades obtingudes al realitzar les rutines "filtra_exlim" i "correccio_deformacio".

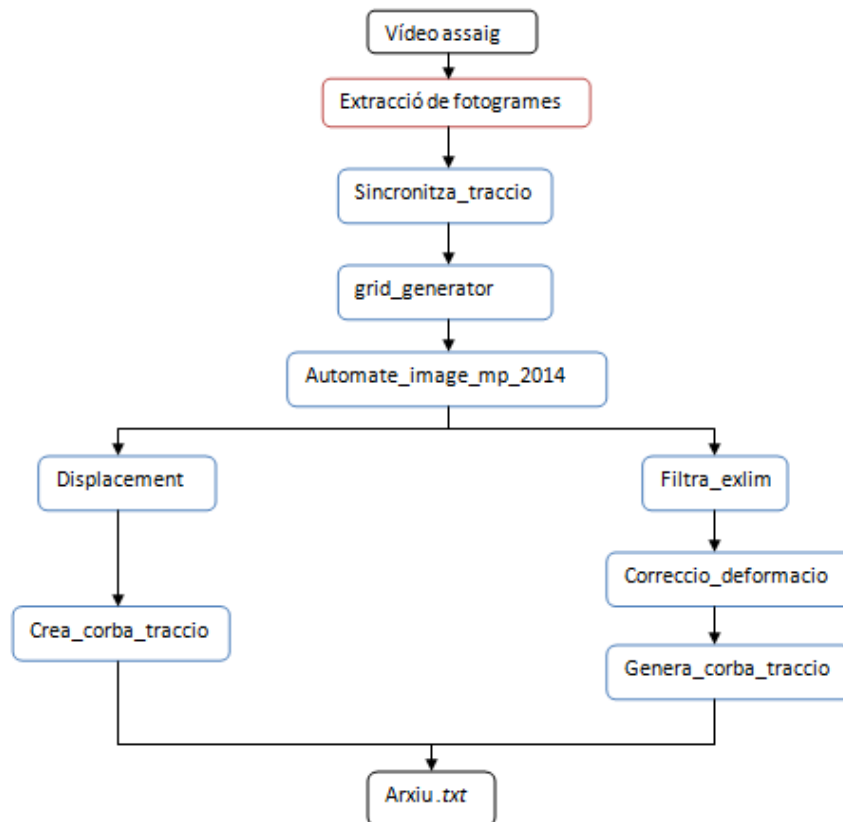


Figura 21. Esquema del processat de dades.

El temps de duració en l'aplicació d'aquestes comandes variava segons la velocitat d'assaig que es fes servir durant l'assaig, per a les provetes assajades a 15,81 mm/min es podien trigar uns 15 minuts per proveta, mentre que per les que eren assajades a 1,58 mm/min es podia arribar a trigar 1 hora.

Un cop obtingudes les deformacions i les tensions a les quals havia estat sotmesa la proveta assajada, el següent pas va ser importar l'arxiu .txt obtingut amb la rutina "crea_corba_tracció" en una plantilla anomenada "Corba", on aquestes dades eren corregides, ja que en moltes de les provetes no es van tarar les mordasses abans d'assajar. La deformació X i la tensió real eren copiades i introduïdes a la plantilla "Anàlisis_tracció", en la qual es calculaven els següents paràmetres:

- **Mòdul de Young (Gpa).** S'obté a partir del pendent de la part elàstica de la corba tensió- deformació. Aquest ha estat calculat mitjançant aproximacions dels pendents per a poder precisar de la millor manera possible el seu valor.
- **Mòdul de Resiliència (Mpa).** És la capacitat que tenen els materials per a acumular energia elàstica abans de tornar-se viscosos o entrar en règim de

fluència. El seu valor correspon a l'àrea compresa sota la corba tensió-deformació fins al límit elàstic.

- **Límit elàstic o d'elasticitat (Mpa).** És la tensió màxima a la que pot ser sotmès un material sense patir deformació permanent. Es troba en el punt de la corba tensió-deformació on el material és sotmès a una deformació plàstica del 0,2%.
- **Elongació màxima (%).** És una magnitud que mesura la longitud que té el material quan és sotmès a tracció just abans de que es produeixi la seva ruptura.
- **Tensió màxima (Mpa).** És la major tensió a la que pot ser sotmesa la proveta abans de la ruptura.
- **Mòdul de tenacitat (Mpa).** Representa l'àrea total dins de la gràfica tensió-deformació. Indica la densitat d'energia de deformació unitària del material abans de trencar-se.

Aquests paràmetres van ésser calculats per a totes les provetes per tal de poder visualitzar diferències en el comportament de les mostres assajades amb corrent i posteriorment analitzar-les i discutir els resultats.

CAPÍTOL 3:

ANÀLISI I DISCUSSIÓ

DELS RESULTATS

Un cop assajades i processades totes les provetes es va procedir a l'anàlisi i discussió dels resultats obtinguts. Començant per la velocitat de 1,58 mm/min tot seguit es podrà veure l'anàlisi realitzat per a totes les mostres, comparant-les segons les variables que es van aplicar inicialment, és a dir, si van ser assajades amb corrent o sense corrent i si van ser assajades en DL o en DT respecte a la direcció de laminació. Aquest anàlisi pretén determinar el comportament que presenten aquestes per a cada velocitat d'assaig, i veure les possibles diferències de l'alumini base respecte al laminat que s'ha emprat en aquest projecte. Cal tenir en compte que, com s'ha mencionat en apartats anteriors, totes les mostres assajades amb corrent han estat sotmeses a la mateixa freqüència de corrent (400Hz) i la mateixa duració de pols (200µs).

Un cop representats gràficament tots els assajos, degut a la visible problemàtica amb les deformacions (veure subapartats següents) l'anàlisi ha mostrat grans incoherències en el valor del càlcul del mòdul de Young de les mostres. És per això que s'ha optat per comparar únicament el valor del límit elàstic i la tensió màxima de les mostres en les dues direccions de laminació (DL i DT) com es veurà a continuació. Totes les gràfiques d'aquest capítol han estat realitzades amb el software Origin degut a la llibertat que permet a l'hora de modificar aquestes.

3.1. Velocitat d'assaig de 1,58 mm/min

A continuació es mostren les corbes tensió-deformació per a totes les provetes assajades a una velocitat de 1,58 mm/min. A la Figura 22 es pot veure gràfica de les corbes de les provetes sense corrent i amb corrent per a una direcció DL respecte la laminació. Amb l'objectiu d'analitzar-les amb més precisió, a la Figura 23a, 23b es mostra el comportament que desenvolupen en la zona elàstica els dos grups de mostres. En les Figures 24, 25a i 25b, es poden observar les mateixes gràfiques però per a una direcció DT respecte a la laminació.

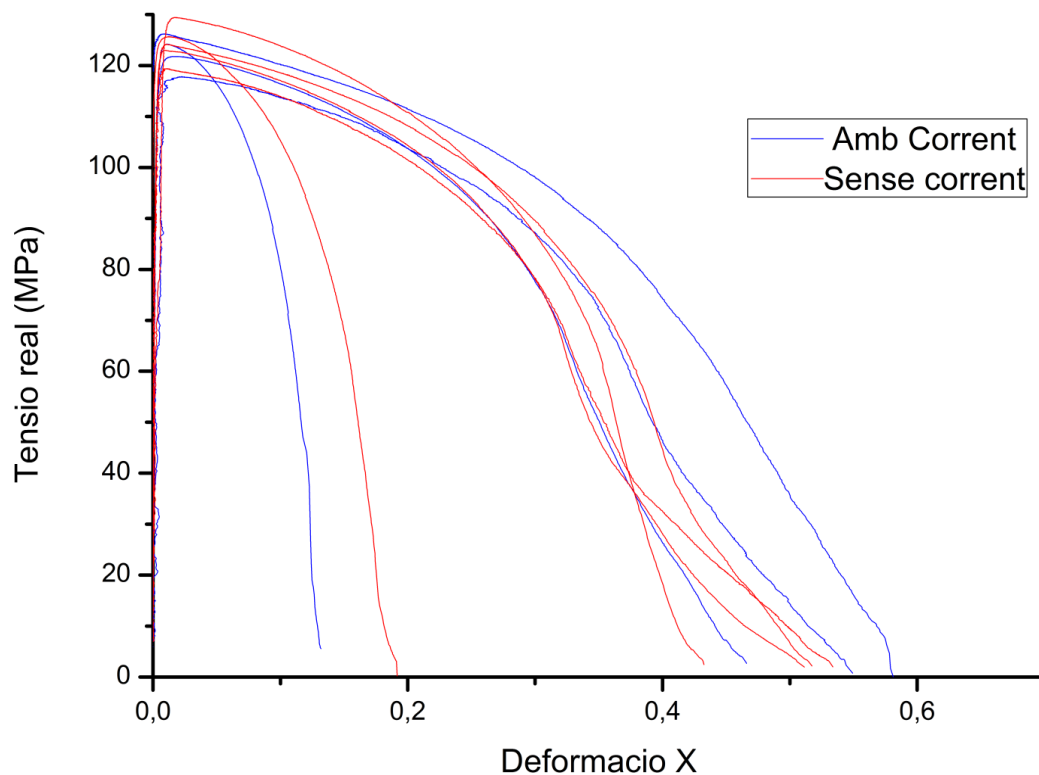


Figura 22. Corba tensió vs. Deformació de les mostres de DL assajades a 1,58 mm/min.

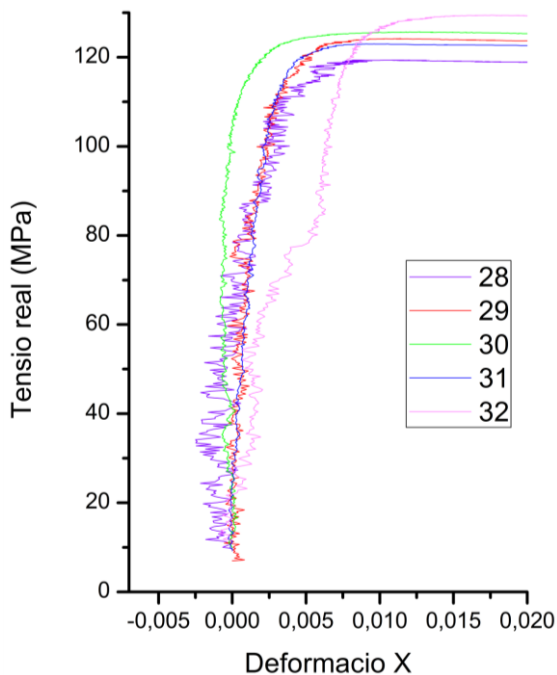


Figura 23a. Zona elàstica de les mostres de DL sense corrent a una velocitat de 1,58 mm/min.

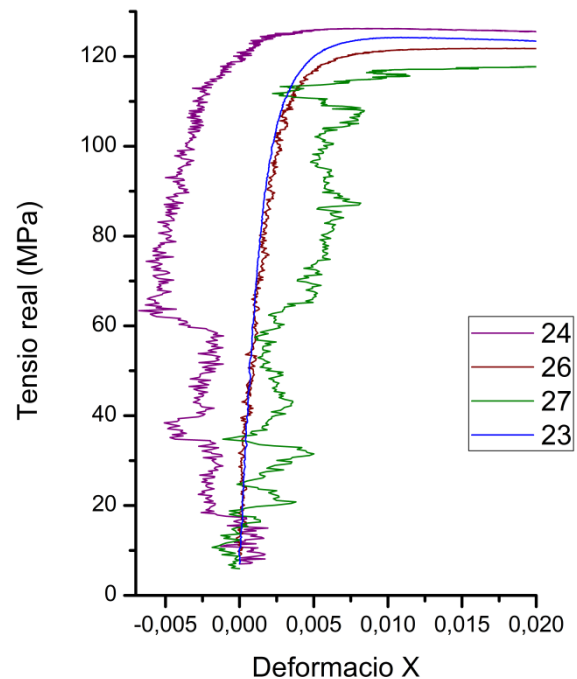


Figura 23b. Zona elàstica de les mostres de DL amb corrent a una velocitat de 1,58 mm/min.

En la Figura 22 es pot veure que aparentment no hi ha diferències notables entre les mostres de corrent i les que no tenen corrent, ambdues tenen valors molt similars pel que fa a la tensió màxima, amb valors entre 115-125 MPa. Si es fa un cop d'ull a les tendències en els límits elàstics de les mostres assistides amb corrent però, mostren uns valors lleugerament inferiors (117,8 MPa) respecte a les mostres assajades en condicions normals (121,6 MPa). Aquest fet pot ser causat per el moviment de les dislocacions a dins del material que dóna lloc a un comportament més dúctil. Les figures 23a i 23b mostren la zona elàstica dels dos conjunts de mostres, on es pot observar que les mostres 24, 27, 32 i 28 presenten grans anormalitats en els seus desplaçaments que poden ser deguts possiblement a moviments de la càmera o la proveta durant el vídeo com va succeir en treballs anteriors aquest, és per això que no es tindran en compte de cara als resultats.

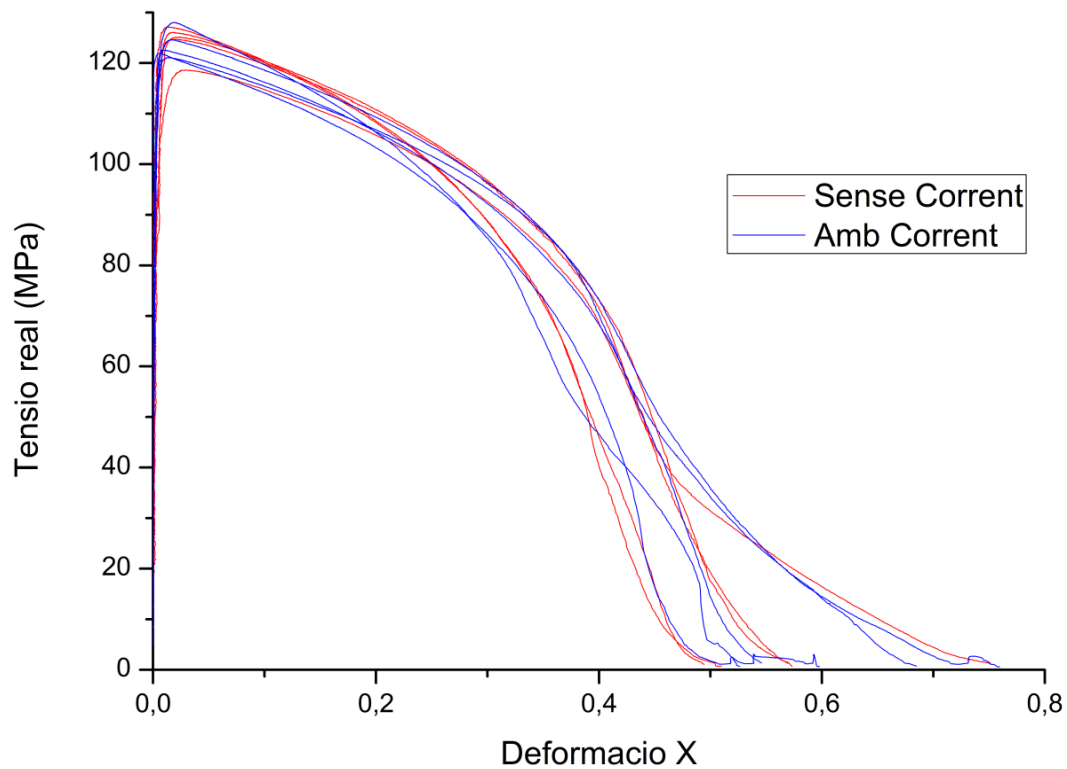


Figura 24. Corba tensió vs. Deformació de les mostres de DT assajades a 1,58 mm/min.

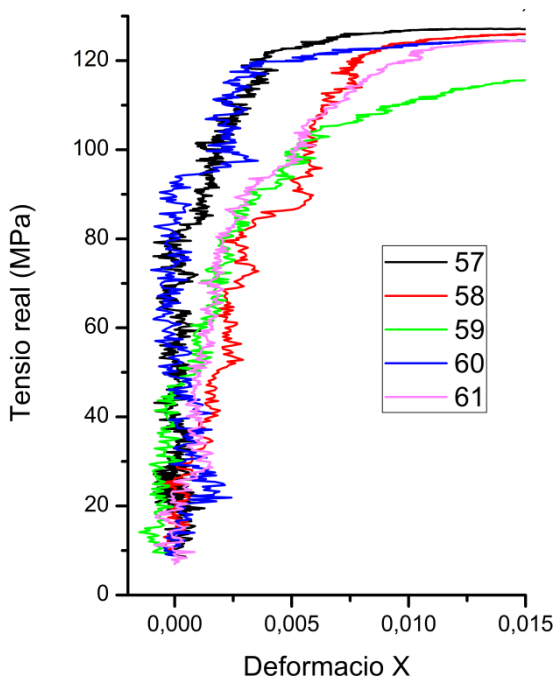


Figura 25a. Zona elàstica de les mostres de DT sense corrent a una velocitat de 1,58 mm/min.

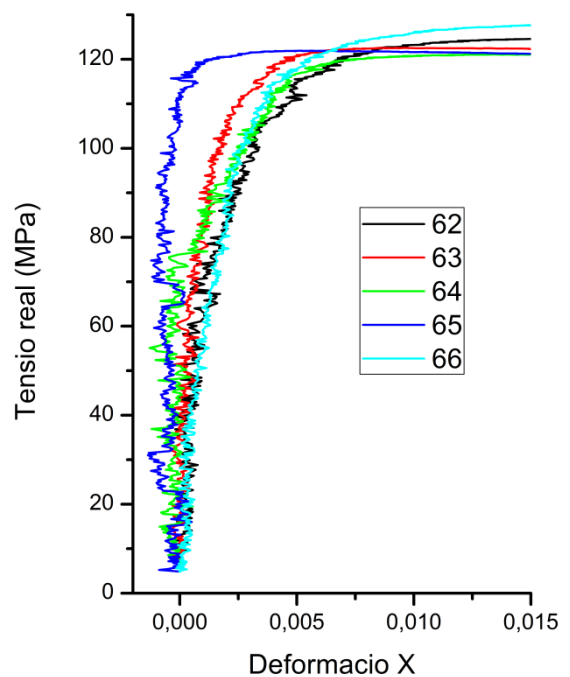


Figura 25b. Zona elàstica de les mostres de DT amb a una velocitat de 1,58 mm/min.

En el cas de les provetes de DT passa una situació similar que amb les de DL, on el límit elàstic en les mostres sense corrent és lleugerament més alt que han estat assistides amb corrent, és a dir, que com abans les provetes amb corrent

són més dúctils degut al moviment de dislocacions. En aquestes mostres però sí que hi ha diferències clares pel que fa a la tensió màxima, com es pot observar en la Figura 24, on les mostres sense corrent (línies vermelles) tenen de mitja valors més alts. Donant un cop d'ull a treballs anteriors s'ha observat que aquest últim comportament en les mostres a velocitats baixes també va succeir en el treball de l'Alex Domínguez, tot i que en el seu cas eren provetes en direcció DL.

Tot i tenir algunes mostres amb força soroll, és a dir, amb deformacions negatives de tal manera que la corba no queda clarament definida, en les que han estat assajades per corrent es pot observar una certa homogeneïtat en el seu comportament en la zona elàstica (Figura 25b). Per contra les mostres sense corrent (Figura 25a) segueixen comportaments diferents i amb molt soroll en general.

3.2. Velocitat d'assaig de 5 mm/min

A continuació es mostren les corbes tensió-deformació per a totes les provetes assajades a una velocitat de 5 mm/min. A la Figura 27 es pot veure gràfica de les corbes de les provetes sense corrent i amb corrent per a les mostres de DL respecte la laminació. Amb l'objectiu d'analitzar-les amb més precisió, a la Figura 26a, 26b es mostra el comportament que desenvolupen en la zona elàstica els dos grups de mostres. En les Figures 28, 29a i 29b, es poden observar les mateixes gràfiques però per a les mostres amb DT respecte a la laminació.

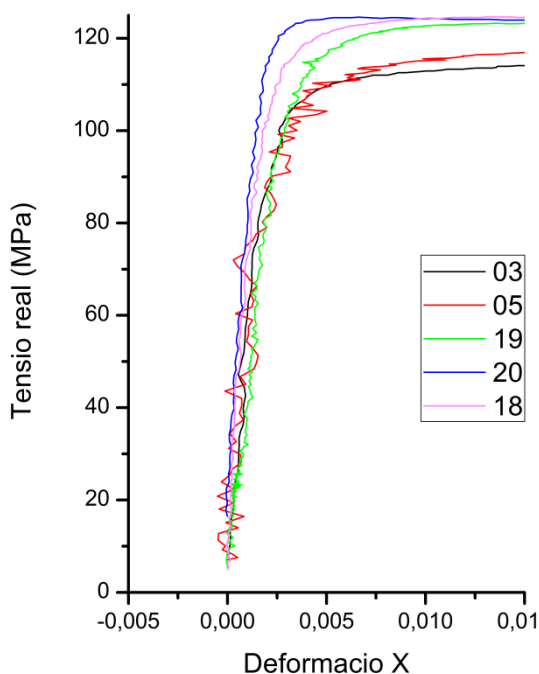


Figura 26a. Zona elàstica de les mostres de DL sense corrent a una velocitat de 5 mm/min.

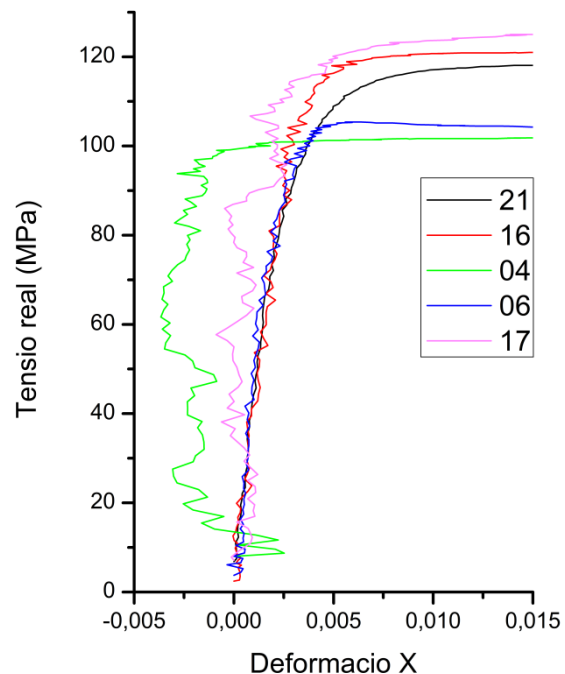


Figura 26b. Zona elàstica de les mostres de DL amb corrent a una velocitat de 5 mm/min.

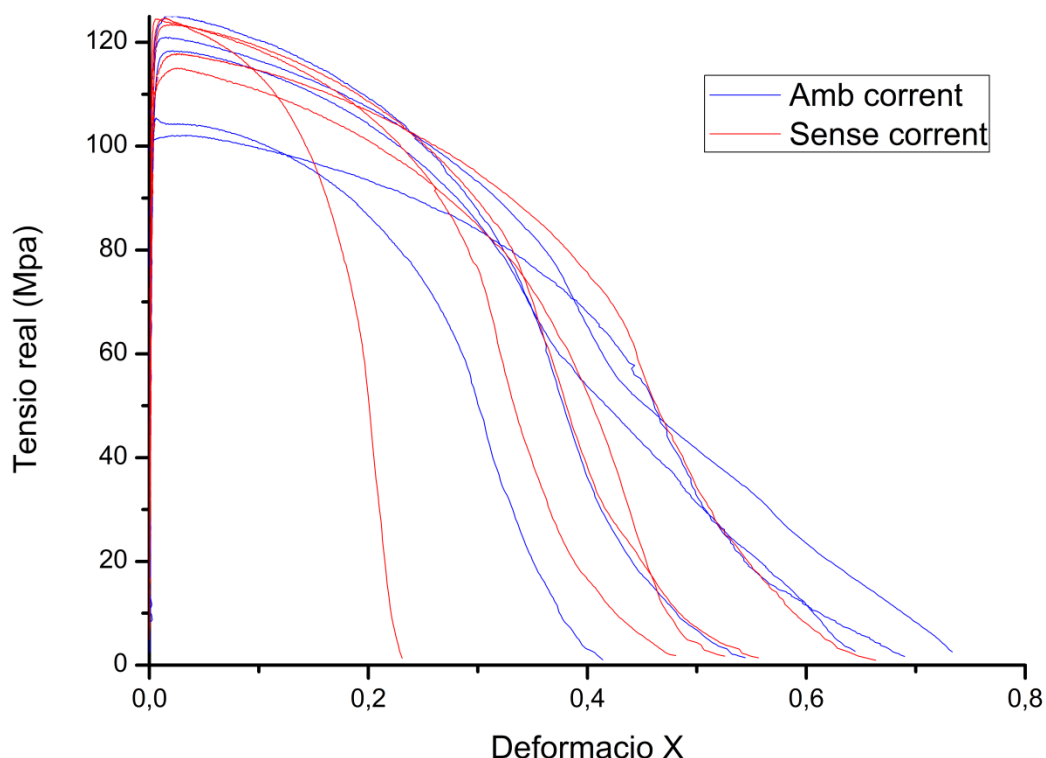


Figura 27. Corba tensió vs. Deformació de les mostres de DL assajades a 5 mm/min.

5

En la Figura 27 es pot observar que aparentment no hi ha grans diferències entre les mostres amb corrent i sense corrent per a aquesta velocitat, val a dir que hi ha molta variabilitat en el comportament en la zona plàstica de les corbes. Aquest fet, com en el cas anterior, pot ser degut a incoherències en el captat i processat d'imatges.

Mirant amb més de prop les corbes i centrant-nos en la zona elàstica, en la Figura 26a i 26b s'observa que en les mostres sense corrent el comportament és bastant semblant en la majoria, excepte en la mostra 05, on hi ha algunes deformacions negatives que corrompen el resultat. En les mostres amb corrent també es pot observar certa homogeneïtat en el comportament, però en el cas de les mostres 04 i 17 les deformacions negatives, possiblement produïdes per recol·locacions o problemes en el captat d'imatge, afecten molt negativament i per tant no es tindran en compte.

Malgrat tot, a l'hora d'analitzar aquestes provetes no s'han obtingut resultats concloents, ja que hi ha molta variabilitat en els valors de les propietats mecàniques tant en les mostres assistides amb corrent com les que no. Aquest fet fa que no es pugui extreure cap conclusió clara d'aquest assaig, tot i això, tant els valors de les tensions màximes com els dels límits elàstics estan dintre del rang que marca la normativa mencionada en apartats anteriors per a un H14.

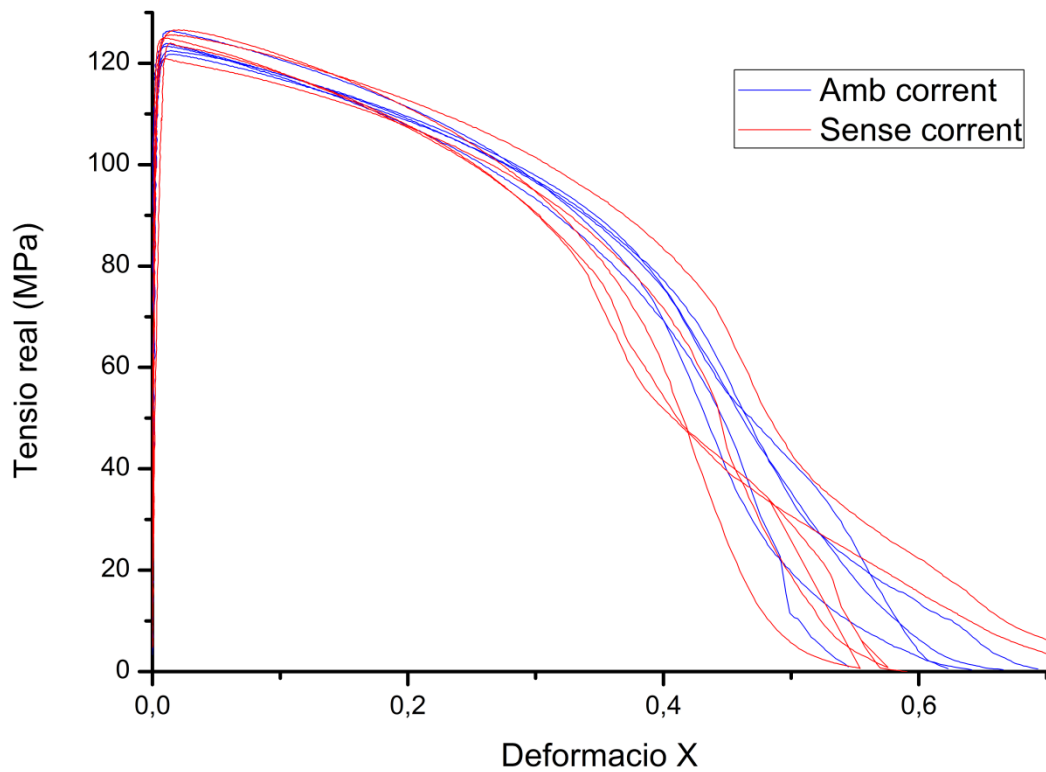


Figura 28. Corba tensió vs. Deformació de les mostres de DT assajades a 5 mm/min.

5

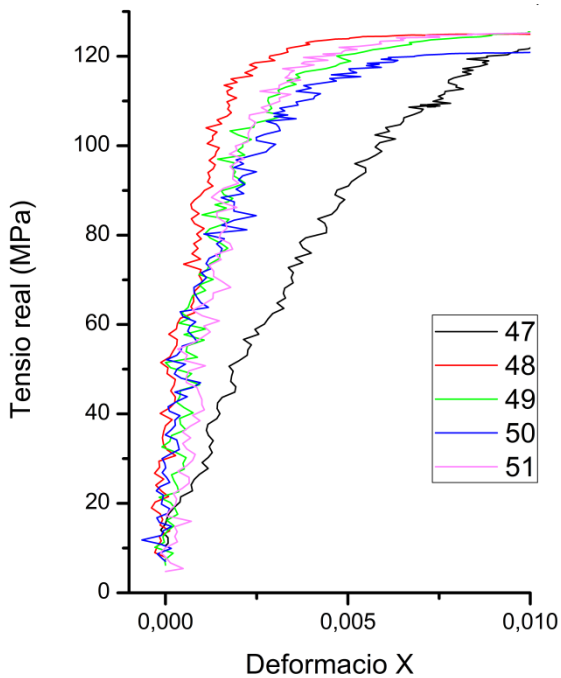


Figura 29a. Zona elàstica de les mostres de DT sense corrent a una velocitat de 5 mm/min.

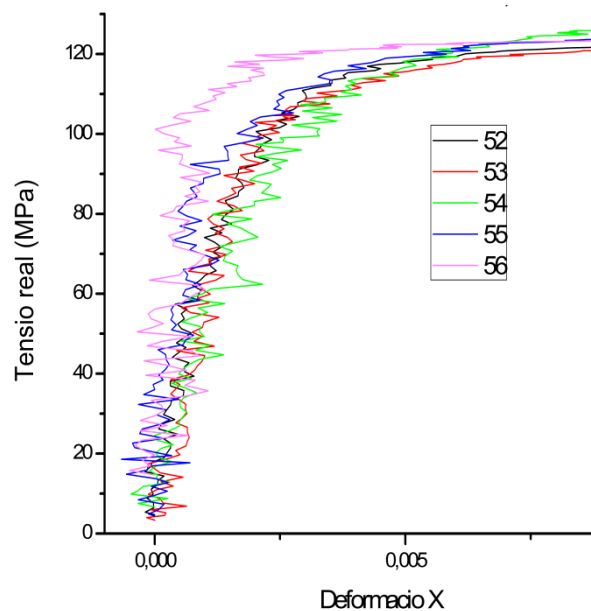


Figura 29b. Zona elàstica de les mostres de DT amb corrent a una velocitat de 5 mm/min.

En la figura 28 es pot observar que ambdós tipus de mostres presenten un comportament molt similar durant tota la corba, malgrat això, fent un zoom a la zona elàstica, en les figures 29a i 29b s'observa que en les provetes assistides amb corrent la zona elàstica és lleugerament més gran que les que no han estat assajades amb corrent, tot i això el resultat no arriba a ser del tot fiable i per tant no es tindrà en compte en els resultats degut a les incoherències en les deformacions d'ambdues espècies, especialment en les provetes 47, 55 i 56.

Fent un anàlisi de les propietats mecàniques d'ambdues espècies s'observa un patró de comportament molt similar al de les mostres assajades a 1,58 mm/min, les provetes sense corrent (línia vermella Figura 28) arriben a tensions màximes més altes (121 MPa) que les assajades amb corrent (114 MPa). Els valors calculats per als límits elàstics són bastant semblants per ambdues espècies però, amb valors que oscil·len entre els 110-120 MPa.

3.3. Velocitat d'assaig de 15,81 mm/min

A continuació es mostren les corbes tensió-deformació per a totes les provetes assajades a una velocitat de 15,81 mm/min. A la Figura 30 es pot veure gràfica de les corbes de les provetes sense corrent i amb corrent per a una direcció de deformació de DL respecte la laminació. Amb l'objectiu d'analitzar-les amb més precisió, a la Figura 31a, 31b es mostra el comportament que desenvolupen en la zona elàstica els dos grups de mostres. En les Figures 32, 33a i 33b, es poden observar les mateixes gràfiques però per a una direcció de deformació de DT respecte a la laminació.

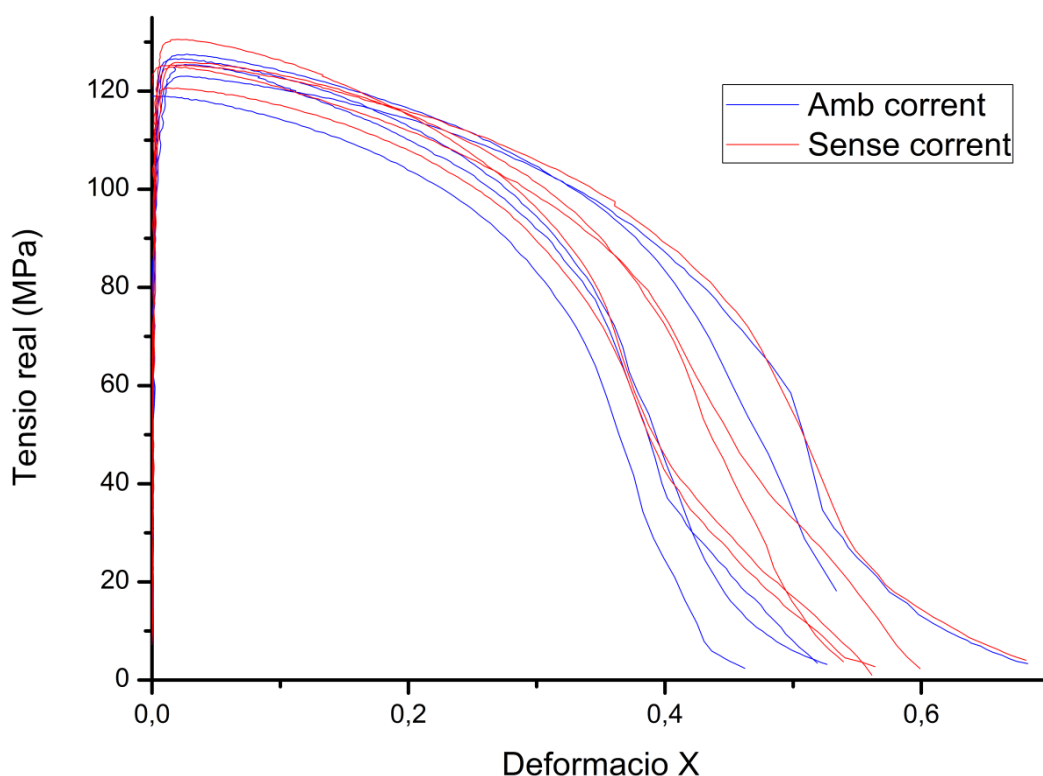


Figura 30. Corba tensió vs. Deformació de les mostres de DL assajades a 15,81 mm/min.

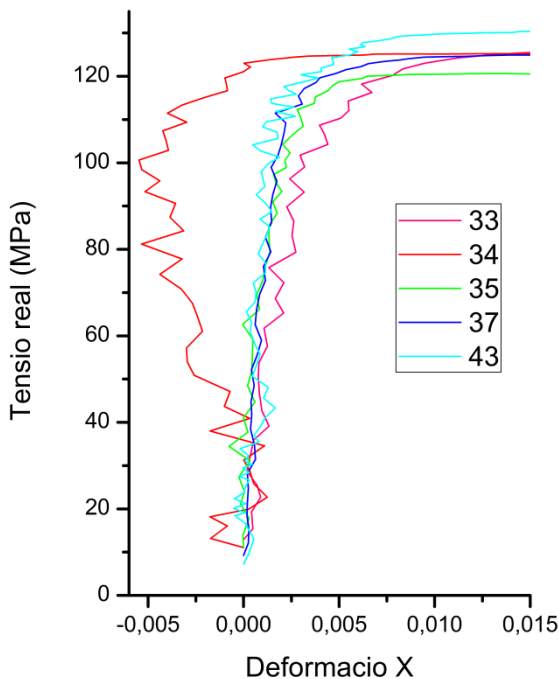


Figura 31a. Zona elàstica de les mostres de DL sense corrent a una velocitat de 15,81 mm/min.

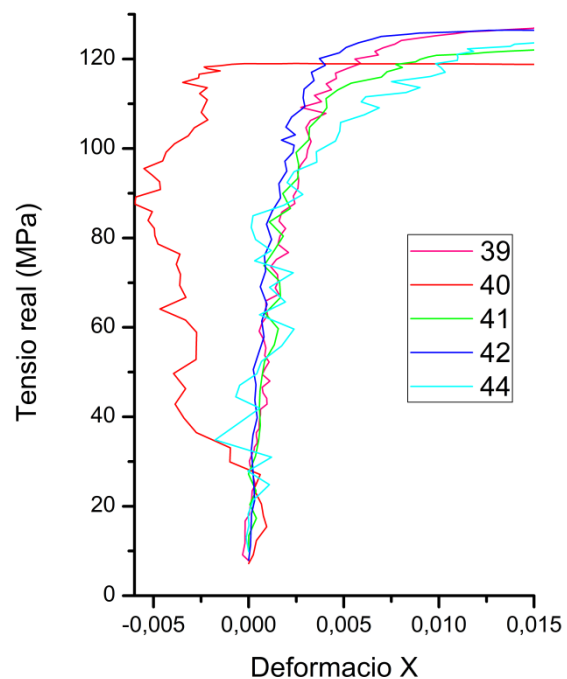


Figura 31b. Zona elàstica de les mostres de DL amb corrent a una velocitat de 15,81 mm/min.

La Figura 30 mostra la corba tensió-deformació per a les provetes de DL i assajades a 15,81 mm/min. Aparentment no hi ha grans diferències entre ambdues espècies ja que presenten un comportament molt semblant totes elles al llarg de la corba. Si es fa un zoom en aquestes en la zona elàstica, tal com mostren la figura 31a i 31b es segueix observant aquest comportament generalitzat, amb valors de tensió màxima que oscil·len entre 120-130 MPa i uns valors del límit elàstic sorprenentment baixos (83-105 MPa) respecte als assajos anteriors.

S'ha hagut de descartar les dades de les mostres 34 i 40 en l'anàlisi de les propietats mecàniques degut a les grans incoherències que presenten en les deformacions. En la resta de les mostres també es poden observar força incoherències, però no tant importants, això també és degut a que al assajar a una major velocitat d'assaig el nombre de dades obtingudes a partir del processat es veu reduït, fet que fa que comporta un marge d'error més gran.

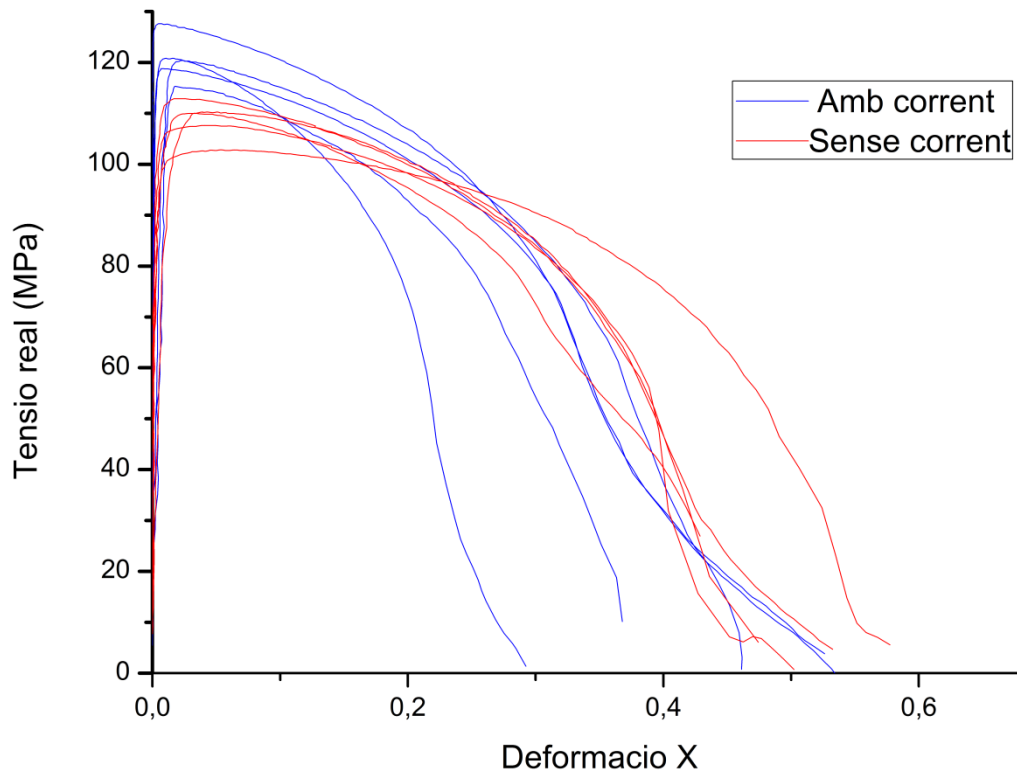


Figura 32. Corba tensió vs. Deformació de les mostres de DT assajades a 15,81 mm/min.

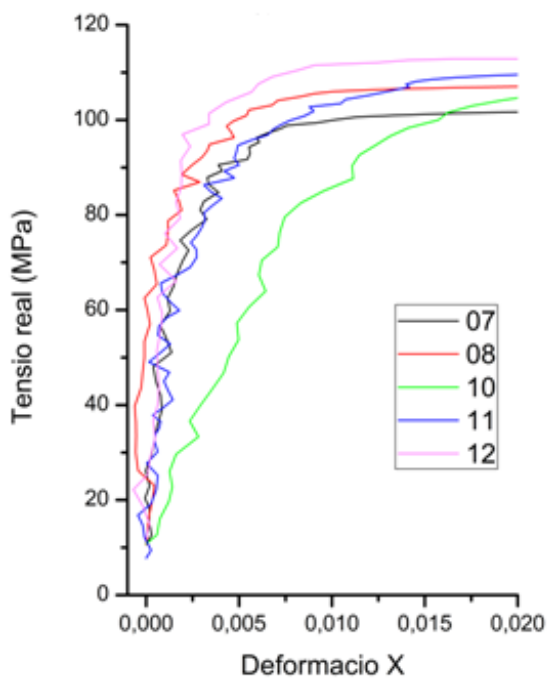


Figura 33a. Zona elàstica de les mostres de DT sense corrent a una velocitat de 15,81 mm/min.

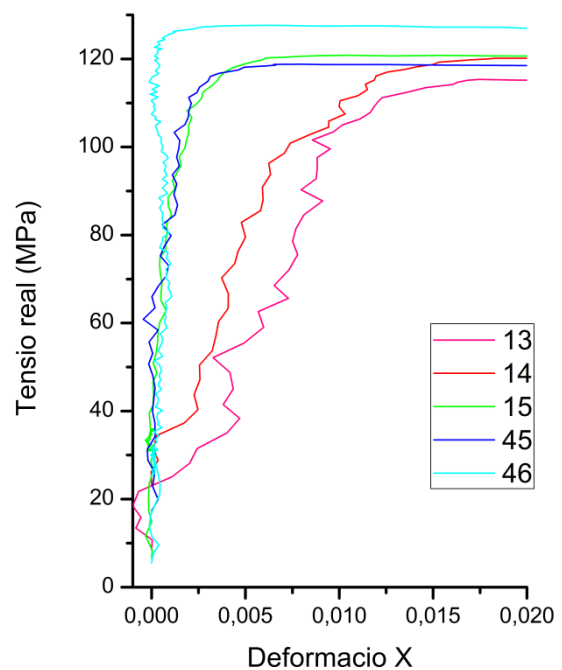


Figura 33b. Zona elàstica de les mostres de DT amb corrent a una velocitat de 15,81 mm/min.

La Figura 32 mostra la corba tensió-deformació per a les provetes assajades a DT respecte a la laminació a 15,81 mm/min. En aquesta velocitat ha succeït el fenomen contrari a les anteriors, ja que com es pot observar a simple vista les tensions màximes de les mostres assajades amb corrent de mitjana són notablement superiors (prop de 130 MPa).

Centrant l'estudi en la zona elàstica (figures 33a i 33b) s'observa que hi ha moltes incoherències en les deformacions, sobretot en les mostres 10, 13 i 14, però descartant aquestes, es pot veure que en les provetes assajades amb corrent el límit elàstic és més alt i la zona elàstica és visiblement més petita que amb les assajades sense corrent, és a dir, que arriben abans a la zona de deformació permanent, presentant un comportament més fràgil.

3.4. Efecte de la velocitat sobre el valor límit elàstic

Tot seguit es mostren a les figures 34 i 35 les gràfiques comparatives del valor del límit elàstic per a les diferents velocitats d'assaig que s'han emprat tant en les provetes assistides amb corrent com en les que no amb l'objectiu de veure'n les diferències que s'han obtingut en les dues direccions de laminació mencionades anteriorment (DL i DT). Els valors dels límits elàstics han estat obtinguts a partir de la plantilla de càlcul "Anàlisi_tracció" nombrada en apartats anteriors.

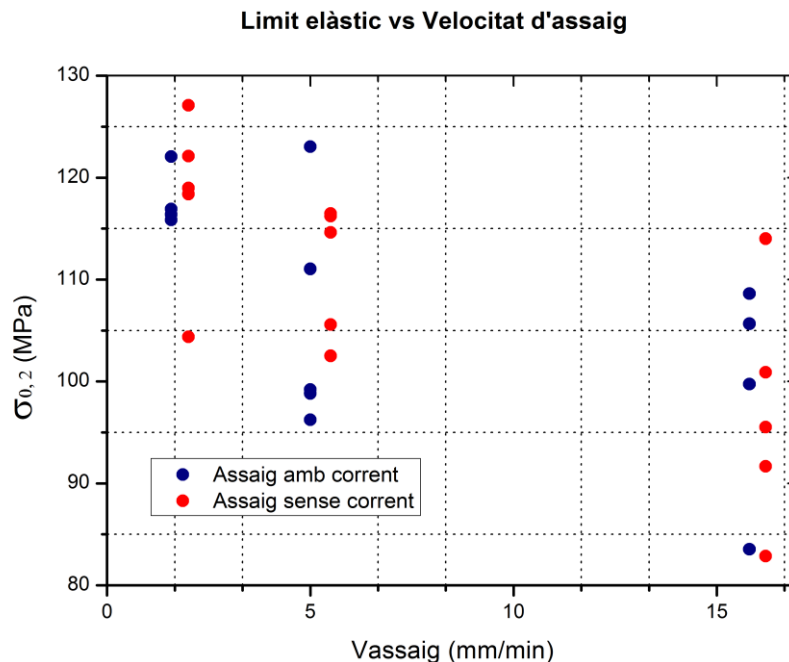


Figura 34. Gràfica del límit elàstic en funció de la velocitat d'assaig per a les mostres de DL.

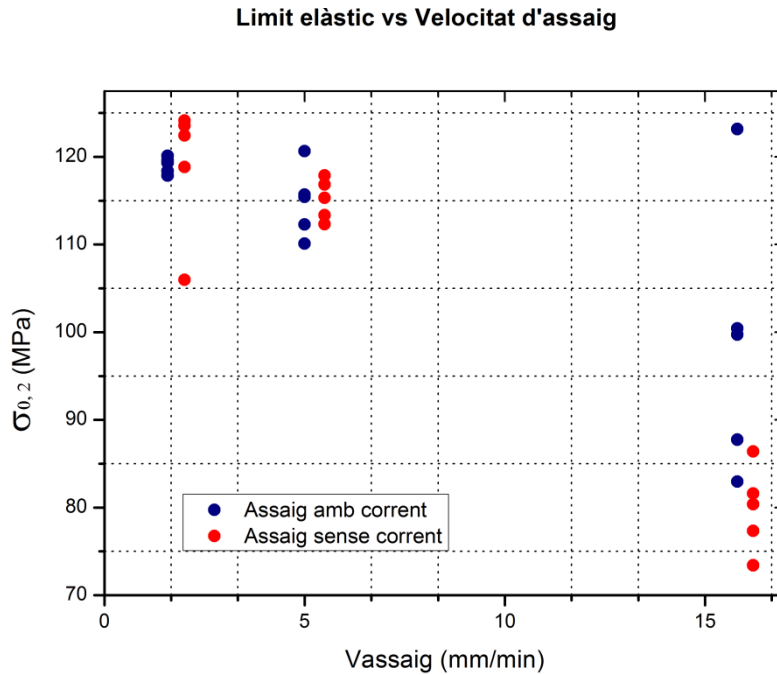


Figura 35. Gràfica del límit elàstic en funció de la velocitat d'assaig per a les mostres de DT.

Com es pot veure en la Figura 34, en les mostres de DL no s'han obtingut resultats concloents degut a la variabilitat dels valors obtinguts en el límit elàstic. Únicament es pot observar que en la velocitat de 1,58 mm/min els valors estan més agrupats mostrant un límit elàstic superior en les provetes assajades sense corrent.

Per contra, les mostres de DT representades en la Figura 35 si que presenten diferències entre les espècies amb corrent i sense en la velocitat de 1,58 mm/min i de 15,81 mm/min, ja que els valors resten més agrupats. Un fet rellevant però, és que donen resultats contraris en les dues velocitats, a la velocitat de 1,58 mm/min les provetes assajades sense corrent mostren un valor més alt del límit elàstic respecte a les assajades amb corrent a diferència de la velocitat de 15,81 mm/min en la qual són les provetes assajades amb corrent les que obtenen els valors més alts.

Comparant les dues direccions de laminació, a priori es pot veure que en general els valors del límit elàstic en les mostres de DT són lleugerament més alts excepte en la velocitat de 15,81, on sorprenentment arriben a valors inferiors a 80 Mpa, és a dir, inferiors als valors esperats per a un alumini AW1050 H14 segons la norma. També s'observa que en ambdós casos el valor del límit elàstic es veu reduït a mesura que augmenta la velocitat d'assaig.

3.5. Efecte de la velocitat sobre el valor de la tensió de ruptura

A continuació es mostren a les figures 36 i 37 les gràfiques comparatives del valor de la tensió màxima per a les diferents velocitats d'assaig que s'han emprat tant en les provetes assistides amb corrent com en les que no amb l'objectiu de veure'n les diferències que s'han obtingut en les dues direccions de laminació mencionades anteriorment (DL i DT). Els valors de les tensions màximes han estat obtinguts a partir de la plantilla de càlcul "Anàlisi_tracció" nombrada en apartats anteriors.

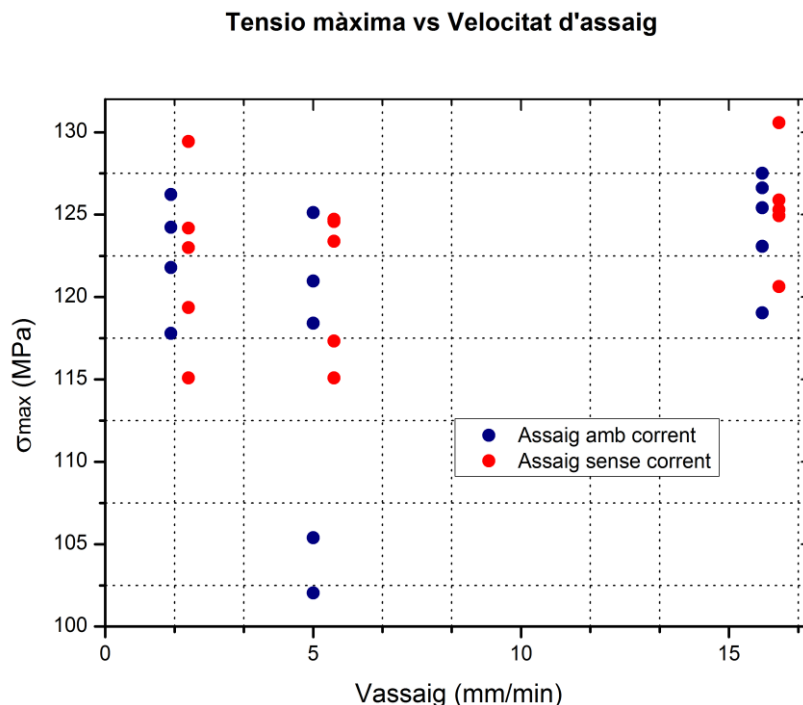


Figura 36. Gràfica de la tensió màxima en funció de la velocitat d'assaig per a les mostres de DL.

Com podem veure en la Figura 36, per a les mostres de DL ha succeït el mateix problema que en l'apartat anterior, entre les mostres hi ha massa variabilitat en els valors de tensió màxima per a poder comparar-les entre elles en les 3 velocitats mostrades.

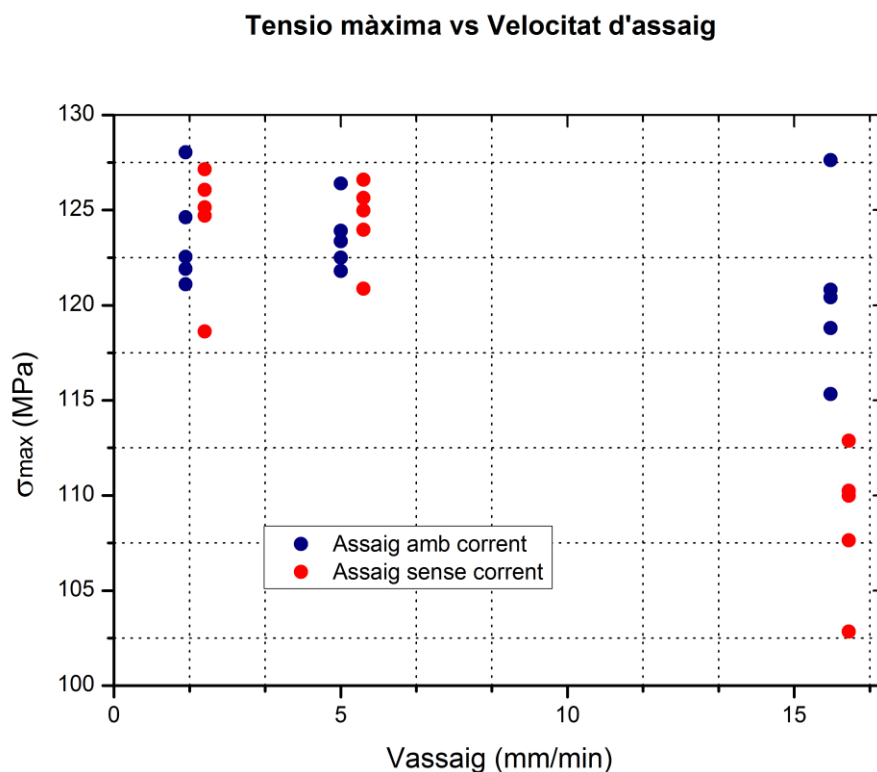


Figura 37. Gràfica de la tensió màxima en funció de la velocitat d'assaig per a les mostres de DT.

En el cas de les mostres assajades a DT respecte a la direcció de laminació si que es poden visualitzar diferències entre les dues espècies de provetes, tal com mostra la Figura 37. La gràfica mostra que per a velocitats baixes d'assaig (1,58 mm/min i 5 mm/min) els valors de la tensió màxima en les provetes assajades amb corrent és en general són més baixos que en les assajades sense corrent, tal com ha succeït en altres treballs anteriors realitzats en aquest camp.

Per contra, a la velocitat de 15,81 mm/min s'ha donat el fet contrari, és a dir, en aquest cas les mostres assajades amb corrent tenen clarament valors més alts de tensió màxima (al voltant de 120 MPa), essent per tant més resistents a la tracció.

Comparant les mostres de DL i de DT es pot afirmar que tenen comportaments realment diferents ja que els valors de tensió màxima, sobretot en la velocitat de 15,81 mm/min són superiors en les mostres de DL, ja que a DT el valor màxim oscil·la de mitjana en 120 Mpa mentre que en les de DL la mitjana és d'aproximadament 126 MPa.

3.6. Comparació de mètodes de processat

Com s'ha comentat en apartats anteriors en el tram final de l'elaboració d'aquest projecte es van elaborar 3 rutines noves per al processat de dades, les quals sorgien com a una alternativa per a millorar el mètode anterior. La innovació d'aquestes respecte les anteriors consisteix en que corregeixen els defectes en els desplaçaments de la proveta produïts durant la captació de dades de l'assaig i els possibles desalineaments en el mallat de la mostra. Degut a la falta de temps

per a implementar aquestes en totes les mostres, s'ha optat per a aplicar-les únicament en el processat de dades de dues de les assajades a DL respecte a la laminació i a una velocitat d'assaig de 1,58 mm/min. A continuació es mostren els resultats obtinguts en ambdós mètodes per a cada una de les dues mostres:

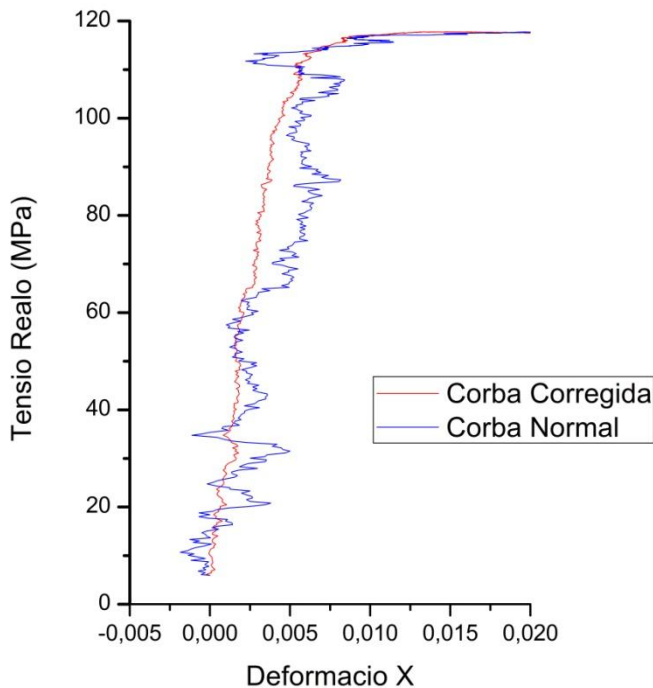


Figura 38a. Zona elàstica de la mostra 27 abans i després de ser corregida.

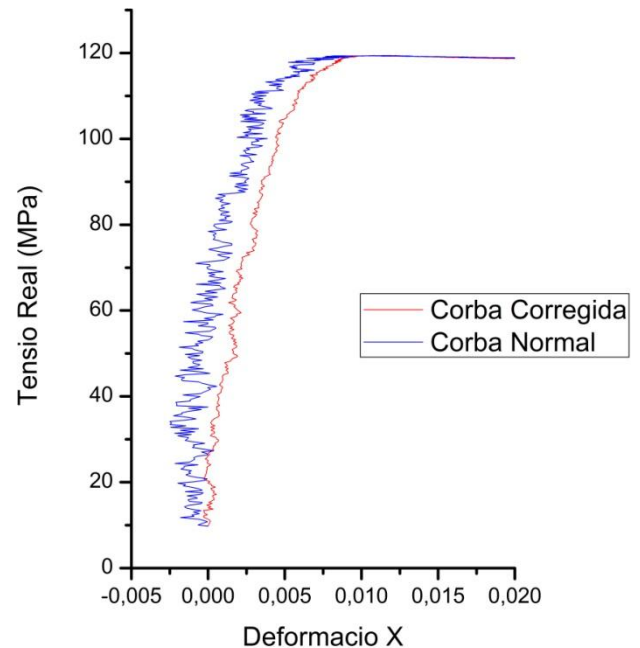


Figura 38b. Zona elàstica de la mostra 28 abans i després de ser corregida.

Les provetes escollides per a aplicar aquest mètode han estat dues de les quals donaven resultats incoherents i amb la qual cosa havien estat descartades, malgrat això s'ha escollit una assajada amb corrent (27) i una sense corrent (28). Si s'observen detingudament ambdues mostres representades gràficament a les figures 38a i 38b es pot veure clarament que la millora és considerable respecte al mètode anterior, ja que el pendent en la zona elàstica de les corbes corregides (línies vermelles) està molt més definit, degut a la desaparició de les deformacions errònies. També s'ha de destacar la dràstica reducció de les deformacions de les corbes corregides que mostra la Figura 39, on també es pot veure que aquestes arriben molt abans a la zona d'estricció.

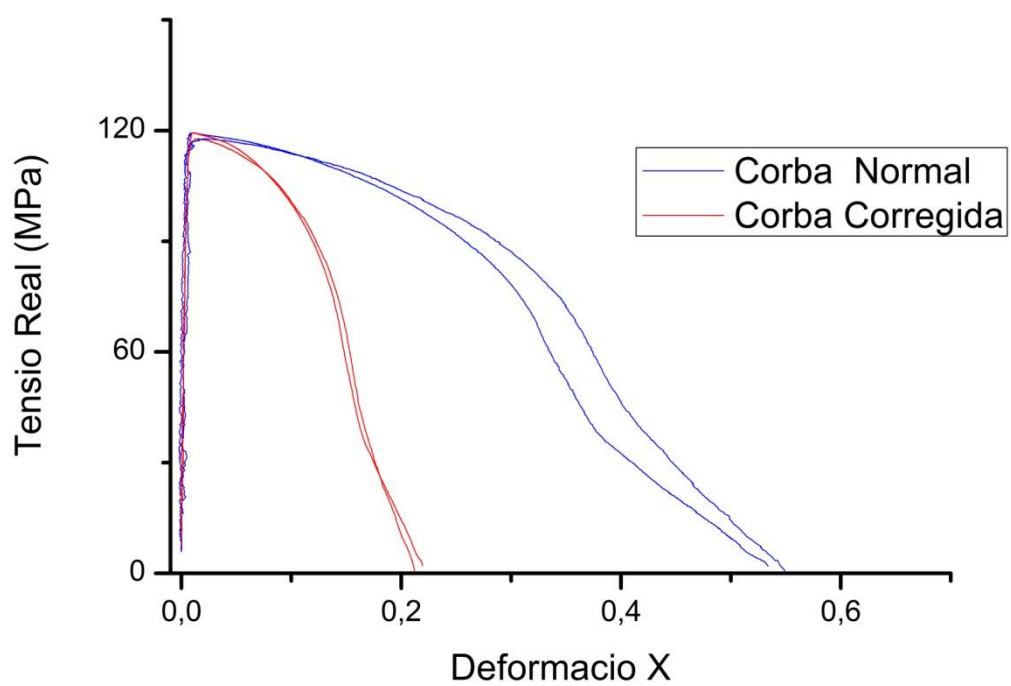


Figura 39. Corba tensió deformació de les mostres 27 i 28 abans i després de ser corregides.

CAPÍTOL 4:

CONCLUSIONS

En aquest treball finalment s'han assajat i analitzat un total de 60 provetes de microtracció per a tal de determinar l'efecte que produïa el corrent elèctric polsant en les propietats mecàniques d'un alumini AW1050 H14.

Hi han hagut diversos treballs anteriors que s'han realitzat a l'EUETIB, com pot ésser el cas del treball de l'Àlex Domínguez (2015), Ramón Jimenez (2014) o el del Xavier Romero (2014) en els quals s'ha cercat la electroplasticitat per diversos mètodes, fet que ha ajudat a anar millorant el procediment d'assaig, processament de dades i anàlisi de resultats al llarg d'aquests últims anys.

Un fet rellevant obtingut en aquest projecte és referit a la duresa del material assajat, ja que després de determinar aquesta en la làmina de material de partida (Alumini AW1050 H14) i en el material un cop laminat, s'han obtingut uns resultats pràcticament idèntics (40 HV i 41,5 HV respectivament) i molt propers al valor orientatiu descrit en la norma UNE 38114: 2000. Si s'observen les figures 34,35,36 i 37, els valors assolits en el límit elàstic i la tensió màxima obtinguts a partir dels assajos concorden també amb els que marca la norma, permetent afirmar que el material laminat presenta les mateixes característiques d'un alumini AW1050 H14, mentre que al haver estat deformat en fred aproximadament un 50% aquest sí més no hauria d'haver endurit de manera proporcional i amb la qual cosa, haver reflectit uns valors de tensió superiors. És per això que no es pot afirmar haver assolit l'objectiu que es perseguia amb la deformació en fred. Aquest fet insòlit pot ser degut per diverses causes, però el més raonable és pensar que la seva corba d'enduriment té un caràcter lineal i pràcticament horitzontal, és a dir, que el límit elàstic, i conseqüentment la tensió màxima no es veuen quasi incrementats a mesura que augmenta la deformació en fred.

Pel que fa als objectius marcats en el capítol 1 d'aquest projecte, es poden afirmar les següents conclusions :

- Les mordasses dissenyades i fabricades en aquest projecte per assajar les provetes de microtracció han millorat el mètode d'assaig en diversos aspectes, tot i que els valors finals obtinguts del processament de dades segueixen essent, com en treballs anteriors, molt dispersos pel que fa a les deformacions. Com a principal avantatge respecte a dissenys anteriors faciliten la col·locació de la proveta i la fixació d'aquestes a la màquina de microtracció gràcies a un disseny senzill i segur, fet que ha ajudat a agilitzar el procediment d'assaig. A la vegada el seu principal inconvenient és que degut al roscat entre la mordassa superior i la màquina el conjunt no queda paral·lel a la màquina sinó que queda desviat i aquest error s'ha de corregir girant la càmera, malgrat això aquest fet no influeix en els resultats.

Per adequar les mordasses noves al mètode d'assaig, durant aquest projecte s'ha modificat el protocol d'assaig per a provetes de microtracció (Annex E), juntament amb aquest també s'ha modificat el protocol de re-adreçament de làmines emprat durant la deformació en fred aplicada al material, ja que aquest restava incomplet.

- Es pot afirmar que el mètode emprat en el processament de dades ha estat millorat amb les rutines noves (filtra_exlim, correcció_deformacio, genera_corba_tracció). Aquestes, com es veu en l'apartat 3.6 eliminen una gran part del "soroll" produït durant el captat d'imatges de l'assaig, fet que pot contribuir enormement en el posterior processament de dades. Per contra, el fet de que la rutina filtra_exlim estigui limitada a 600 dades fa que només es pugui aplicar aquest mètode en assajos amb velocitats de deformació reduïdes, ja que a velocitats majors de 15 el nombre de dades obtingudes es veu reduït per sota d'aquest líndar.
- Malgrat a la gran dispersió de dades que s'ha obtingut, es pot afirmar donant un cop d'ull a les figures 34, 35, 36 i 37 que en les mostres de DT s'obtenen resultats més concloents que en les de DL, en les quals els resultats tant en corrent com sense corrent donen valors molt diversos, tot i així es pot afirmar també que els valors dels límits elàstics i tensions màximes són en general més alts en les mostres de DL, i per tant, es pot afirmar a partir dels resultats obtinguts que aquest material és més resistent assajat en aquesta direcció. El fet de que a DT s'hagin observat resultats més concloents pot ser atribuït al canvi d'enfocament de la càmera explicat en el capítol 2 ja que aquest ens ajuda a una major precisió en el mallat i per tant en l'anàlisi, tot i que per contra al haver ampliat la zona d'observació les petites desalineacions de la proveta respecte a l'horitzontal es veien incrementaves.
- Degut a la dispersió de dades obtinguda, a partir de l'anàlisi es pot afirmar que no s'han obtingut resultats concloents que expliquin l'efecte atèrmic de l'electroplasticitat. Tot i això en les mostres de DT s'ha observat que a velocitats baixes (1,58 mm/min i 5 mm/min) les mostres amb corrent obtenen valors inferiors de tensió màxima respecte a les mostres assajades sense corrent, per contra a velocitats altes (15,81 mm/min) es dona el fet contrari. Això pot ser degut a que al deformar a poca velocitat el material adopta un comportament més dúctil i amb això arriba abans a la zona plàstica de la corba, és lògic pensar que aquest efecte ha estat incrementat en les mostres amb corrent, ja que segons les teories del efecte electroplàstic, aquest incrementa la ductilitat de la mostra gràcies al moviment de les dislocacions. El fet de que a 15,81 mm/min s'observi un comportament més

fràgil pot ser degut a que la ruptura d'aquest material a tracció esdevé fràgil per a velocitats altes i que aquest efecte s'incrementi amb al fer-hi passar polsos de corrent elèctric.

Com s'ha comentat, únicament s'han observat diferències entre les espècies assajades amb corrent i les que no en les mostres assajades a DT, això pot ser degut a que al assajar en una direcció perpendicular al laminat, el material presenta més fronteres de gra en aquesta direcció, i per tant més resistència i més espais per a ser ocupats per a dislocacions. Per contra en la direcció DL el material presenta una menor densitat de grans en la direcció de deformació però aquests estan més allargats degut a aquesta deformació.

4.1. Línies futures

A partir de les conclusions extretes en aquest projecte es poden definir unes línies de treball per a estudis futurs que podrien contribuir a millorar el mètode d'assaig i processament de dades actual de cara a una recerca més acurada de l'efecte atèrmic conseqüència de l'electroplasticitat. Les línies de treball proposades són les següents:

- ❖ Fer passar el corrent en una direcció que no sigui en la de deformació, per exemple perpendicularment, ja que en molts estudis anteriors a aquest projecte és on s'ha pogut observar més freqüentment aquest efecte.
- ❖ Deixar de banda la rutina "displacement" del MATLAB i aplicar en comptes d'aquesta les rutines "filtra_exlim", "correccio_deformacio" i "genera_corba_traccio" per a un estudi sencer.
- ❖ Realitzar el mateix projecte però partint d'una altre aliatge d'alumini que tingui una duresa superior.
- ❖ Fer un estudi més centrat en el comportament de les provetes assajades a DT respecte a la laminació, especialment entre les mostres assajades a velocitats altes i baixes.
- ❖ Emprar un altre mètode en la captació de deformacions de l'assaig que sigui més precís, un exemple en seria el de posar una segona càmera a perpendicular al pla de la proveta, amb la qual cosa es podrien eliminar els errors produïts en els moviments i recol·locacions de la proveta durant l'assaig, tal com s'ha proposat en treballs anteriors.

CAPÍTOL 5:

BIBLIOGRAFIA

5.1. Referències bibliogràfiques

- ¹ Antonio J. Sánchez Egea et al. 2014. Electroplasticity-assisted bottom bending process. *Journal of Materials Processing Technology*, No. 214: 2261-2267.
- ² C. R. Green et al. 2009. Xpringback elimination for Al-6111 alloys using electrically assisted manufacturing. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of SME*, vol. 37: 403-410.
- ³ Fabreguè D. et al. 2014. Enhanced recovery and recrystallization of metals due to an applied current. *Scripta Materialia*, No. 42: 3-6.
- ⁴ G. Tang et al. 2000. Experimental study of electroplastic effect on stainless steel wire 304L. *Materials Science and Engineering: A281*: 263-267.
- ⁵ H. Conrad. 2000. Electroplasticity in metals and ceramics. *Materials Science and Engineering: A287*: 276-287.
- ⁶ John T. Roth, et al. 2014. The mechanical behavior of 5052-H32 aluminum alloys under a pulsed electric current. *International Journal of plasticity*, No. 58,: 84-99.
- ⁷ J. Zhang et al. 2002. Effect of current pulses in the drawing stress and properties of Cr17Ni6Mn3 and 4J42 alloys in the cold-drawing process. *Journal of Materials Processing Technology*, No. 120: 13-16.
- ⁸ Lei Guan et al. 2010. Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing. *Journal of Materials Research*, vol. 25, No.17.
- ⁹ L. Kai, X. Dong, H. Xie, F. Peng 2015. Effect of current on the deformation behavior of AZ31B magnesium alloy. *Materials Science and Engineering*, vol. 623: 97-103.
- ¹⁰ Magargee, J. Et al. 2013. Characterization of flow stress for commercially pure titanium subjected to electrically-assisted deformation. *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 135.

- 11** M. Molotskii and V. Fleurov. 1995. Magnetic effects in electroplasticity of metals. *The American Physical Society*, vol. 52, No.22
- 12** Michel I. Molotskii. 2000. Theoretical Basis for electro- and magnetoplasticity. *Materials Science and Engineering*: A287: 248-258.
- 13** O. A. Troitskii and V. I. Likhtman. 1963. Anisotropy of electron and radiation on the deformation of brittle Zinc Single Crystals. *Soviet Physics JETP*, vol. 248, No. 332
- 14** O. A. Troitskii. 1969. Electromechanical effect in metals. *Pis'ma Zhurn Experim Teoret Fiz*, No. 10: 18.
- 15** Sprecher, A.F. et al. 1986. Effect of an electric field on the recovery and recrystallization of Al and Cu. *Scripta Metallurgica*, vol. 23: 821-824.
- 16** Stanton, C. T., et al. 1994. Investigation of the electroplastic effect using optical and conventional techniques. *Journal of Materials Research*, vol. 10: 258-260.
- 17** V. Y. Kravchenko. 1967. Effect of directed electron beam on moving dislocations. *Soviet Physics JETP*, vol. 24, No. 6.
- 18** Wesley A. Salandro et al. 2012. Effect of electrical pulsing on various Heat Treatments of 5XXX series aluminum alloys. *9th International Pipeline Conference*, Calgary, Alberta, Canada.
- 19** Y. Zhou et al. 2002. Improvement of mechanical properties in a saw blade by electropulsing treatment. *Elsevier Science*. No. 57: 1566-1670.

5.2. Bibliografía de Consulta

- Domínguez Hervella, X. 2015. TFG Efecto de la acritud sobre la electroplasticidad en materiales FCC.
- Romero Pedret, X. 2014. TFG Analysis of the effects of heat treatments on electroplasticity of AA6082.
- W. D. Callister, Jr. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales (vol.1). 1995. Ed Reverté.
- Jiménez Pradas, R. 2014. TFG Estudio de la influencia de la microestructura de materiales FCC sobre su electroplasticidad.
- Alu-Stock. "Aleaciones de aluminio". Darrer accés Abril 3, 2015. <http://www.alu-stock-es/catalogo/pdf/libro5/LA5-Cap11-Aleaciones-de-aluminio.pdf>
- UNE-EN ISO 6507-1:2006. Materiales metálicos. Ensayo de dureza Vickers. Parte 1: Método de ensayo.
- UNE 38114: 2000. Aluminio y aleaciones de aluminio para forja. Serie 1000. Aleación EN AW-1050 A i EN AW-Al 99,5.